

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra částí a mechanismů strojů

**Návrh rámu dvoučlánkové  
nízkopodlažní jednosměrné tramvaje**

Design of a Frame for a Two-cell One  
Direction Low-floor Tram

Student:

Jiří Dobiáš

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Trochta

Ostrava 2018

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Dobiáš**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení  
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin  
Téma: **Návrh rámu dvoučlánkové nízkopodlažní jednosměrné tramvaje**  
**Design of a Frame for a Two-cell One Direction Low-floor Tram**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Navrhnete ocelový skelet vozové skříně tramvajového vozidla dle firmou zadaných parametrů za pomoci designové studie tramvaje (což jsou rozměry vozidla, šířka dveří, výška podlahy, rozmístění míst pro cestující). Návrh zkontrolujte pomocí MKP dle platné normy ČSN EN 15277 kategorie C-IV. Nakreslete sestavný výkres a výrobní výkres dle pokynů vedoucího práce.

### Seznam doporučené odborné literatury:

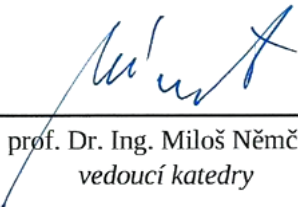
Ondrouch, Šňupárková : *Příručka statiky s příklady*, skriptu VŠB-TU Ostrava, 1986  
Horyl Petr: *Statika a Dynamika*, skriptu VŠB-TU Ostrava, 1988  
Podešva, J.: *Dynamika v příkladech*. VŠB-TU Ostrava, 1999.  
Němček, M.: *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů*, skriptu VŠB-TU Ostrava, 2001

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Trochta**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
prof. Dr. Ing. Miloš Němček  
vedoucí katedry

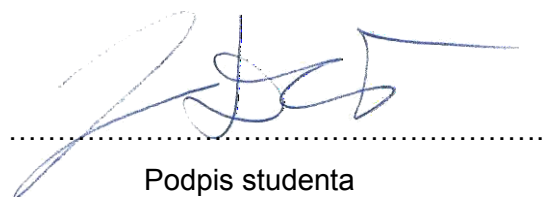


  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018

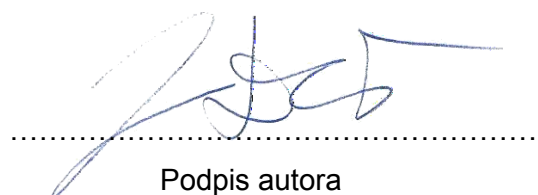
A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized, cursive letters, is written over a horizontal dotted line. The signature appears to be 'P. J. J.' or similar.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- užít toto mé dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, může VŠB-TUO jen s mým souhlasem,
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- беру на ве́домі́, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



Podpis autora

Jméno a příjmení autora:

Jiří Dobiáš

Adresa trvalého pobytu autora:

Moravská 2643/88, Ostrava

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Trochtovi za cenné rady, připomínky a vstřícnost při konzultacích mé práce. Také jeho kolegovi Ing. Jiřímu Začalovi za pomoc a rady týkající se výpočtů MKP. V neposlední řadě pak firmě TRAM FOR ENVI s.r.o., za možnost spolupráce a poskytnutí všech potřebných informací a podkladů.

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DOBIÁŠ, J. *Návrh rámu dvoučlánkové nízkopodlažní jednosměrné tramvaje: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2018, 41 s. Vedoucí práce: Trochta, M.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a ověřením konceptu dvoučlánkové nízkopodlažní jednosměrné tramvaje pro studii proveditelnosti. V první části práce je popsán vývoj tramvajových vozidel na vybraných zástupcích dané kategorie. Vnější rozměrové charakteristiky skříně tramvaje jsou ověřeny dle příslušné normy. Na základě dosavadních konstrukčních řešení je navržen skelet skříně tramvaje a pomocí MKP výpočtu je vhodně rozvrženo jeho vyztužení. Navržený skelet je pevnostně ověřen MKP výpočtem pro provozní zatížení. Skelet je dále ověřen MKP výpočtem inspirovaným ČSN EN 15227 dle požadavků zadavatele. Doprovodná dokumentace je v požadovaném rozsahu umístěna v příloze bakalářské práce.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

DOBIÁŠ, J. *Design of a Frame for a Two-cell One Direction Low-floor Tram: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine Parts and Mechanisms, 2018, 41 p. Thesis head: Trochta, M.

This bachelor thesis deals with a design and verification of a concept of two-cell low-floor one directional tram for feasibility study purposes. In the first part of the thesis an evolution of trams is described on selected examples in given category. External dimensions of the tram cabin are verified according to relevant standard. Based on existing design solutions, the skeleton is designed, and its reinforcement is appropriately arranged using FEM calculation. The proposed skeleton strength worthiness under operational load is validated using FEM calculation. The skeleton is further verified by FEM calculation inspired by EN 15227 according to the company requirements. Accompanying documentation up to demanded extent is located in the bachelor thesis annex.

# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	1
<b>ÚVOD.....</b>	<b>3</b>
<b>1. REŠERŠE KONCEPCÍ TRAMVAJOVÝCH VOZIDEL .....</b>	<b>4</b>
1.1. VYBRANÍ ZÁSTUPCI TRAMVAJOVÝCH VOZIDEL .....	4
<b>2. NÁVRH KONCEPTU TRAMVAJE .....</b>	<b>9</b>
2.1. ZÁKLADNÍ INFORMACE O NAVRHOVANÉM VOZIDLE .....	9
2.2. ROZMĚROVÉ OVĚŘENÍ DLE ČSN 28 0337 .....	11
<b>3. NÁVRH SVAŘOVANÉHO SKELETU.....</b>	<b>17</b>
3.1. HRUBÝ NÁVRH SKŘÍNĚ .....	17
3.2. NÁVRHOVÝ VÝPOČET A NÁVRH VYZTUŽENÍ .....	22
3.3. OVĚŘOVACÍ VÝPOČET .....	30
<b>4. KONTROLNÍ VÝPOČET DLE ČSN EN 15227 .....</b>	<b>34</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>38</b>
ZDROJE.....	39
SEZNAM PŘÍLOH .....	41

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$b$	Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od podélné osy vozidla	[mm]
$d$	Maximální možný radiální posuv otočného čepu ze střední polohy po vyčerpání všech možných vůlí při statické poloze	[mm]
$d_a$	Poměrná vůle	[-]
$e$	Poloviční vzdálenost otočných čepů	[mm]
$E_a$	vzdálenost bodu povrchu vozidla v prostoru vně otočných čepů, měřená od osy obrysu pro vozidla směrem vně oblouku	[mm]
$E_i$	vzdálenost bodu povrchu vozidla v prostoru mezi otočnými čepy, měřená od osy obrysu pro vozidla směrem dovnitř oblouku koleje	[mm]
$F$	zatížení čel ve směru podélné osy skeletu	[kN]
$F_k$	Zatížení od strojvedoucího a dalšího vybavení jeho kabiny	[kN]
$F_{tk}$	Zatížení od technologie v kabině strojvedoucího	[kN]
$F_{ts}$	Zatížení od technologie na střeše předního článu	[kN]
$F_z$	Zatížení od zadního článu	[kN]
$G$	Užitečné zatížení	[kN]
$G_{max}$	Maximální užitečné zatížení	[kN]
$k$	Poloviční šířka obrysu pro vozidla v přímé koleji	[mm]
$l_0$	Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od roviny příčného řezu v místě otočného čepu	[mm]
$l_s$	Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od roviny příčného řezu vozidla procházející středem vzdálenosti otočných čepů	[mm]
$m_k$	Hmotnost strojvedoucího a dalšího vybavení jeho kabiny	[kg]
$m_{tk}$	Hmotnost technologie v kabině strojvedoucího	[kg]
$m_{ts}$	Hmotnost technologie na střeše předního článu	[kg]
$N$	Obsaditelnost vozidla	[-]
$N_{max}$	Maximální obsaditelnost vozidla	[-]



$N_{sed}$	Celkový počet míst k sezení	[-]
$p$	Rozvor podvozku	[mm]
$q$	Poloviční rozvor podvozku	[mm]
$r$	Poloměr oblouku osy koleje	[mm]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$S_{sed}$	Užitečná plocha pro sedící cestující	[m <sup>2</sup> ]
$S_{st}$	Užitečná plocha pro stojící cestující	[m <sup>2</sup> ]
$S_u$	Celková užitečná plocha pro cestující	[m <sup>2</sup> ]
$\delta_a$	Rozšíření vnější části obrysu pro vozidla v oblouku	[mm]
$\delta_i$	Rozšíření vnitřní části obrysu pro vozidla v oblouku	[mm]
$\Delta L$	Minimální zkrácení skříně pro bezpečný průjezd obloukem	[mm]

## Úvod

Tato práce se zabývá navržením a ověřením konceptu skeletu tramvajového vozidla pro studii proveditelnosti. Celá společnost prochází neustálým vývojem a rozšiřováním obzorů. V některých odvětvích lidské činnosti je pokrok patrný na první pohled, v jiných je naopak skrytý pod zdánlivě neměnným povrchem. Na první pohled se může zdát, že, až na posun od přesných pravoúhlých tvarů starších modelů k moderním ladným křivkám současných vozů, se koncept tramvaje jako takové příliš nerozvíjí. Opak je však pravdou. Vývoj tramvají určených pro provoz ve městech, jako součást systému integrované hromadné dopravy, je dynamicky se rozvíjející oblastí se stále se vyvíjejícími nároky na ekonomické, sociální a ekologické aspekty jejich návrhu, výroby a provozu. Tramvaje jsou stále jedním z nejčastěji užívaných prostředků hromadné dopravy a s postupným prosazováním ekologičtějších způsobů cestování a snahou redukovat množství automobilů ve městech je jejich uplatnění v blízké budoucnosti více než jisté.

Cílem této práce je navrhnout konstrukci svařovaného skeletu dvoučlánekové jednosměrné tramvaje, v délkové kategorii 19–21 m s třemi otočnými podvozky a čtyřmi bezbariérovými vstupy pro cestující, a navržený koncept ověřit statickými výpočty MKP do míry potřebné pro studii proveditelnosti definované zadávající firmou. V této bakalářské práci je se souhlasem vedoucího práce, vzhledem k omezení jejího rozsahu, popsána geneze pouze předního článku tramvaje.

V první kapitole je popsán dosavadní vývoj a současný stav techniky moderních elektrických tramvají na vybraných exemplářích zvolené kategorie.

Následující část práce se zabývá nastíněním navrhované koncepce tramvaje a dále návrhem konstrukce vnitřního skeletu skříně tramvajového vozidla. Jsou zde popsány jednotlivé parametry, rozměrové charakteristiky tramvaje a postupný vývoj skeletu doplněný o průběžné výpočty a kontroly.

Poslední kapitola popisuje požadavky na vyhovění normě ČSN EN 15227, které jsou pro potřeby studie proveditelnosti dle požadavků zadavatele a se souhlasem vedoucího bakalářské práce zjednodušeny na kontrolní výpočet skeletu podélně zatíženého statickou silou 250 kN.

# 1. Rešerše koncepcí tramvajových vozidel

Tramvaj je kolejovým vozidlem zpravidla užívaným k dopravě osob v rámci integrovaných systémů městské hromadné dopravy. Jedná se o jedno z nejběžněji užívaných vozidel hromadné dopravy, především ve městech střední velikosti. Současné tramvaje využívají k pohonu elektrickou energii, která je přiváděna obvykle nadzemním trolejovým vedením, méně často pak třetí kolejí či je dodávána z akumulátorů umístěných v tramvaji samotné. (1) Elektrický pohon činí z tramvaje ekologicky přijatelný dopravní prostředek, který do již tak znečištěných městských ulic nevnáší další provozní zplodiny. Tento fakt ji také činí ceněným kandidátem na post hlavního prostředku městské hromadné dopravy v projektech ekologických měst budoucnosti, ve kterých jsou plánovány města využívající výhradně hromadné dopravy osob s pohonem šetrným k životnímu prostředí. Další výhodou oproti silničním vozidlům je vlastní jízdní prostor zajišťující relativní nezávislost na hustotě provozu. (2) V porovnání s ostatními železničními vozidly lze říci, že tramvaje jsou nižší hmotnosti a kompaktnějších rozměrů, které jim usnadňují pohyb a manévrování v ulicích městské zástavby.

## 1.1. Vybraní zástupci tramvajových vozidel

Tato kapitola popisuje postupný vývoj dvoučlankových tramvají v délkové kategorii 19-21 m. Vývoj je popsán výběrem charakteristických zástupců této kategorie z různých časových období a od různých výrobců. Vzhledem k rozsahovému omezení rešerše jsou vybráni pouze nejvýznamnější zástupci, se kterými je možno se v současnosti setkat ve městech střední Evropy.

### 1.1.1. Tatra K2

Tatra K2 (Obrázek 1) je tramvaj tuzemského původu vyráběná v letech 1967-1983 v podniku ČKD Praha. Jedná se o dvoučlankovou kloubovou tramvaj odvozenou od její jednočlankové předchůdkyně Tatra T3. Toto šestnápravové železniční vozidlo je tvořeno dvěma články spojenými kloubem v místě nad středním podvozkem. Celkem je nesené třemi dvounápravovými podvozky, z nichž krajní jsou trakční a střední je běžný. (3) Na každém z článků jsou po pravé straně umístěny dvojice čtyřkřídlé skládací dveře se schůdky umožňujícími výstup do přepravního prostoru. Celá tramvaj je vysokopodlažní o výšce podlahy 900 mm nad temenem kolejnice. Podlaha je tvořena dřevěnou, vodévzdornou překližkou opatřenou gumovým pochozím povrchem. Skla jsou jednovrstvá, uložená v gumových profilech obepínajících okenní otvory. (4) Sedadla pro cestující jsou rozmístěna ve třech řadách v seskupení 2+1 na stojanech ukotvených k podlaze. V přední části vozidla se nachází kabina řidiče oddělená od prostoru pro cestující příčkou s posuvnými dveřmi. Vnější i vnitřní dispozice vozidla jsou zřejmé z obrázku 2. Skelet této tramvaje je tvořen

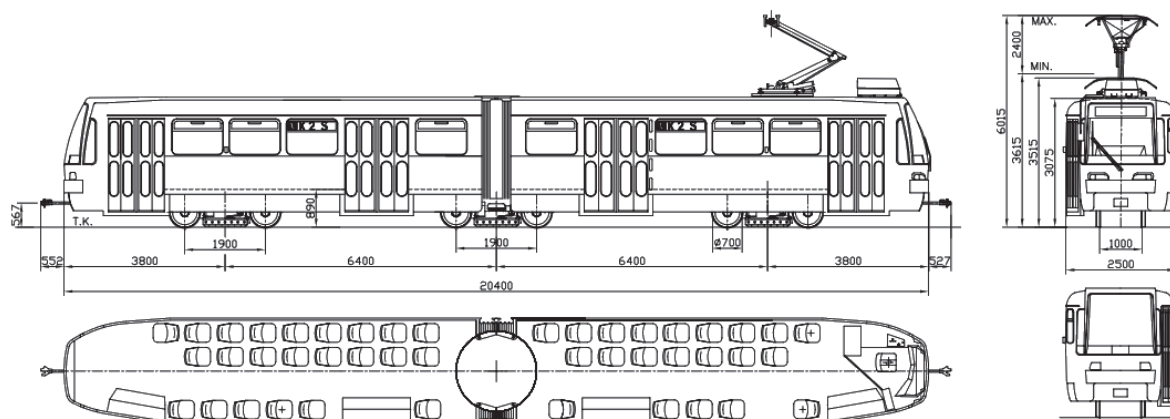
z větší části z plechů doplněných o tenkostěnné profily v místech okenních sloupků. Skelet je dostatečně dimenzován na provozní zatížení a je ověřen mnohaletým provozem tohoto typu tramvaje, nicméně jeho parametry nemohou být vzhledem k podmínkám současné normalizace brány jako směrodatné. (5) Základní parametry tramvaje jsou patrné z tabulky 1.



Obrázek 1 – Tatra K2 v Brně (4)

Tabulka 1 – Základní parametry tramvaje Tatra K2 (5)

Období výroby	1967-1983
Výrobce	ČKD Praha
Délka	20 400 mm
Šířka	2 500 mm
Výška	3 042 mm
Pohotovostní hmotnost	22 000 kg
Vzdálenost otočných čepů	2 x 6 400 mm
Míst k sezení	48 osob
Míst k stání	111 osob



Obrázek 2 – Tatra K2S (modernizace) nákres (6)

### 1.1.2. Bombardier NGT6DE

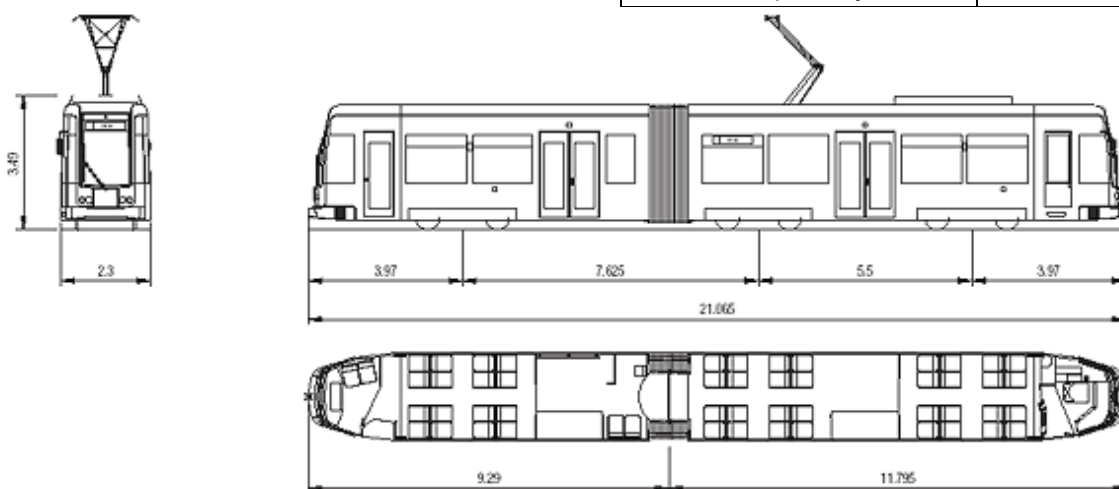
Tento vůz (Obrázek 3) má skříň tvořenou dvěma asymetrickými články. Přední článek je nesen dvěma podvozky, zatímco druhý leží pouze na podvozku jediném a zároveň je zavěšen na přední článek pomocí kloubového spojení. Jedná se o tramvaj s podílem nízké podlahy 70 %, která se nachází v prostoru mezi druhými a třetími dvoukřídlými dveřmi. (7) První a poslední nástupní dveře jsou jednokřídlé a ústí na zvýšenou podlahu s jedním schodem. Rozmístění sedadel je dle vzorce 2+2, sedadla jsou umístěna střídavě vzhledem ke směru jízdy. Skříň vozidla je tvořena dvěma svařovanými ocelovými skelety z tenkostěnných profilů, které jsou kloubově spojeny v místě za středním podvozkem. Základní parametry a dispozice vozidla jsou patrné z tabulky 2 a obrázku 4.



Obrázek 3 – NGT6DE v Desavě (8)

Tabulka 2 – Základní parametry tramvaje Bombardier NGT6DE (9)

Období výroby	2001-2002
Výrobce	Bombardier
Délka	21 070 mm
Šířka	2 300 mm
Výška	3 490 mm
Pohotovostní hmotnost	34 000 kg
Míst k sezení	52 osob
Míst k stání	67 osob
Podíl nízké podlahy	70 %



Obrázek 4 – NGT6DE nákres (10)

### 1.1.3. Vario LF2

Vario LF2 (Obrázek 5) je moderní tramvaj vyráběnou v letech 2008-2017 v české republice Aliancí TW Team (Pragoimex, KOS, VKV Praha). Tato tramvaj byla zkonstruována jako nástupkyně dosluhujících vozů Tatra K2 pro dopravní podniky měst Brna a Ostravy. (11) Jedná se o šestnápravový dvoučlánekový vůz nesený třemi podvozky, které jsou všechny trakční. Tato tramvaj je částečně nízkopodlažní s podílem nízké podlahy 43 %. Nízká podlaha o výšce 350 mm nad temenem kolejnice je ve střední části každého z článků, vysoká podlaha s výškou 860 mm pak nad každým ze tří podvozků. Po pravé straně tramvaje jsou rozmístěny čtyři výklopné či skládací dveře, z nichž krajní jsou vybaveny schůdky a ústí do vysokopodlažních částí. Střední dveře ústí do nízkopodlažních prostorů usnadňují nástup a výstup cestujícím s pohybovým omezením či přepravu kočárků. Dveře nízkopodlažní části předního článku jsou vybaveny výklopnou plošinou pro nájezd invalidního vozíku obsluhovanou strojvedoucím. Kabina strojvedoucího se nachází v přední části a od prostoru pro cestující je oddělena přepážkou s posuvnými dveřmi. Skříň tramvaje je tvořena svařovaným skeletem z tenkostěnných profilů, na kterém jsou nalepeny vnější plechové vrstvy. Skelety obou článků jsou symetrické a spojené kloubem v místě osy středního podvozku. Základní parametry a dispozice tramvaje jsou vyneseny v tabulce 3

a na obrázku 6. Tramvaje Vario LF2 mohou být dodány jako novostavba, nebo jako rekonstrukce její předchůdkyně Tatry K2 s aplikací nové vozové skříně. (12)

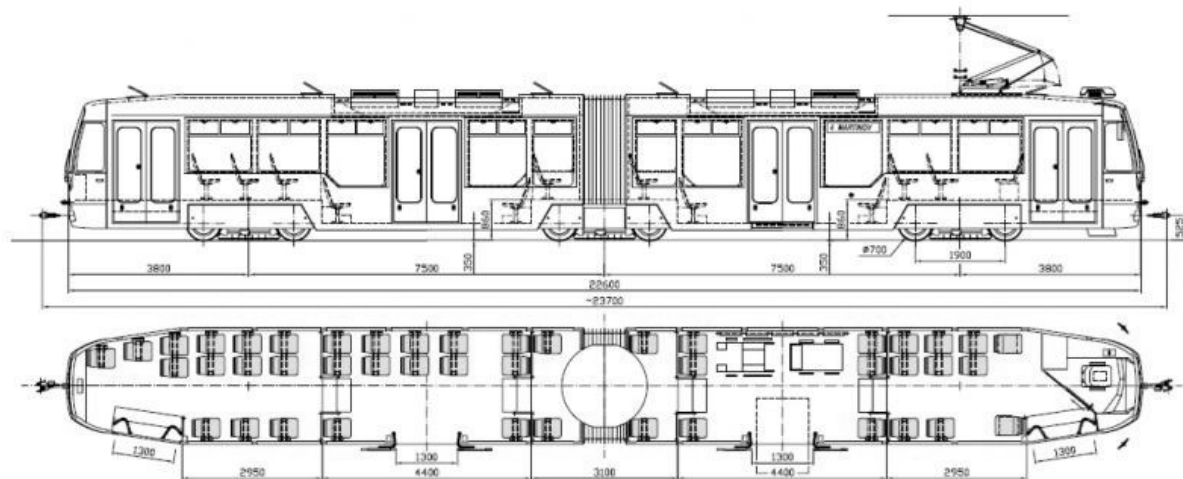
Existuje také varianta s označením Vario LF2 plus. Tato varianta vychází z Vario LF2 a využívá modernizovaného typu podvozků s prohnutou kolébkou. To umožnilo snížení vysokopodlažních částí na výšku 650 mm nad temenem kolejnice. Podlaha je takto snížena pouze v šířce průchozí uličky oddělené od nízkopodlažních částí jediným schodem, pod sedadly však zůstaly podesty o původní výšce 860 mm poskytující prostor pro kola podvozků, jejichž průměr je zachován na hodnotě 700 mm. (13)



Obrázek 5 – Vario LF2 (14)

Tabulka 3 – Základní parametry tramvaje Vario LF2 (13)

Období výroby	2008-2017
Výrobce	Aliance TW Team
Délka	22 600 mm
Šířka	2 480 mm
Výška	3 185 mm
Pohotovostní hmotnost	31 500 kg
Vzdálenost otočných čepů	2 x 7 500 mm
Míst k sezení	46 osob
Míst k stání	94 osob
Podíl nízké podlahy	43 %



Obrázek 6 – Vario LF2 nákres (15)



#### 1.1.4. EVO2

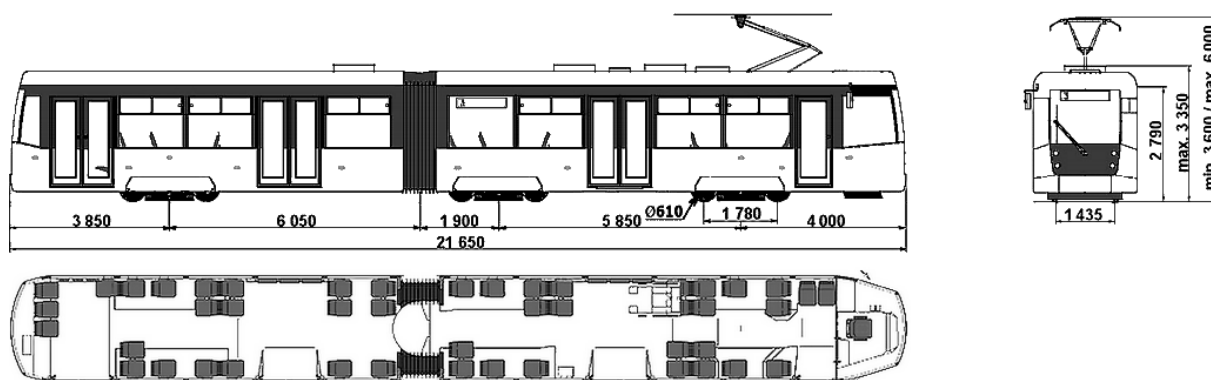
Tato tramvaj (Obrázek 7) je vývojovým nástupcem tramvají řady Vario. Jedná se o plně nízkopodlažní bezbariérovou tramvaj zkonstruovanou na popud dopravního podniku Liberce a Jablonce. Vozidlo je šestinápravové s třemi trakčními podvozky s prohnutou kolébkou a je tvořeno dvěma články. První článek je uložen na dvou podvozcích, druhý článek leží na jednom podvozku a je zavěšen na článku prvním pomocí kloubového spojení v místě za středním podvozkem. (16) Obdobně jako u vozidel řady Vario je skelet obou článků tvořen z tenkostěnných ocelových profilů. Vozidlo je přístupné jedněmi jednokřídlými dveřmi v přední části vozidla a trojicí dvoukřídlých předsuvných dveří rozmístěných po zbývajícím délce skříně. Všechny z dveří umožňují bezbariérový přístup. Tato tramvaj byla doposud vyrobena pouze v jednom exempláři v roce 2012. (17) Základní parametry této tramvaje jsou patrné z tabulky 4 a obrázku 8.



Obrázek 7 – EVO2 (17)

Tabulka 4 – Základní parametry tramvaje EVO2 (16)

Období výroby	2012
Výrobce	Aliance TW Team
Délka	21 650 mm
Šířka	2 560 mm
Výška	3 400 mm
Pohotovostní hmotnost	27 500 kg
Míst k sezení	45+2 osob
Míst k stání	92 osob
Podíl nízké podlahy	100 %



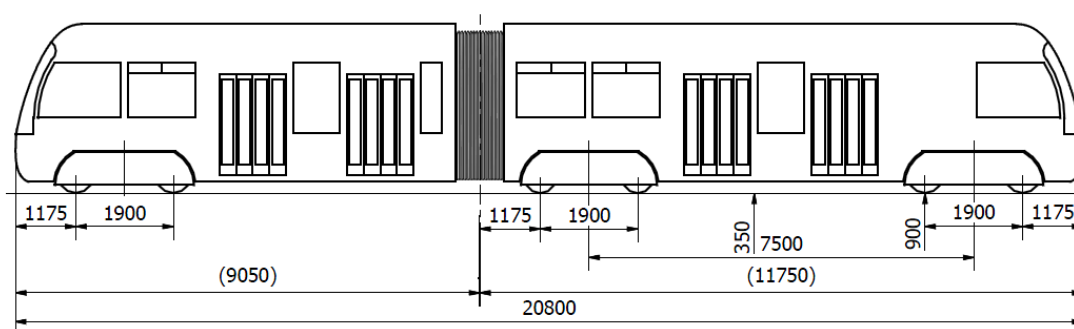
Obrázek 8 – EVO2 nákres (18) - upraveno

## 2. Návrh konceptu tramvaje

Tramvaj je navrhována na základě předběžné designové studie poskytnuté zadavatelem. Zvolená koncepce je šestinápravové vozidlo se dvěma asymetrickými články kloubově spojenými v místě za středním podvozkem. Tento koncept je podrobněji rozebrán dále v této kapitole.

### 2.1. Základní informace o navrhovaném vozidle

Jedná se o dvoučlánekové vozidlo se třemi otočnými podvozky. Články jsou asymetrické, přední článek je nesen dvěma podvozky, zadní článek je nesen jedním podvozkem. Zadní článek je zároveň zavěšen na předním článku, v místě za středním podvozkem, pomocí kloubu umožňujícího rotační pohyb kolem jeho svislé osy a kyvné pohyby ve směrech podélné a příčné osy vozidla tak, aby byl umožněn průjezd směrovým i výškovým obloukem. Podvozky na krajích předního i zadního článku jsou trakční, střední podvozek je umístěn v zadní části předního článku a je běžný s prohnutou kolébkou, což umožní pohodlnější průchod vozidlem. Vzdálenost otočných čepů podvozků předního článku je 7 500 mm, vzdálenost otočného čepu podvozku zadního článku od kloubového spojení článků je 6 925 mm. Podvozky jsou konvenčního provedení s nápravami, o normálním rozchodu 1 435 mm, s koly o průměru 700 mm určené pro evropské městské železniční sítě. Skříň je uložena na podvozky pomocí otočných čepů přivařených k plechovým svařencům – příčnícím v místě příslušného podvozku. Tyto příčníky zajišťují rovnoměrný přenos zatížení mezi podvozky a nosníkovou částí skeletu. Asymetrické řešení konstrukce oproti koncepci se symetrickými články usnadňuje aplikaci snížené uličky nad středním podvozkem. Základní rozměry navrhovaného konceptu jsou zřejmé z obrázku 9.



Obrázek 9 – Základní rozměrové parametry tramvaje X-02

Skříň tramvaje je krabicovitého tvaru se zaoblenou čelní plochou. Šířka skeletu je 2 400 mm, výška přibližně 3 000 mm. Samotný skelet je pravoúhlý s minimem ohýbaných dílů. Čela tramvaje jsou díky malému přesahu skeletu nad čelními podvozky provedena v plné šířce vozidla. Zaoblené vnější křivky jsou vytvořeny laminovanou kapotou.

Tramvaj je jednosměrná, tedy s hlavním pracovním pohybem v jednom směru, a tudíž s jedinou kabinou strojvedoucího na čele předního článku. S tím je také svázán požadavek



na umístění dveří pro výstup a nástup cestujících pouze na pravou stranu vozidla, což umožní plné obsazení levé strany sedačkami a tím navýšení počtu míst k sezení.

Návrh počítá s velkým podílem nízké podlahy v přepravním prostoru soupravy. Kabinu pro cestující tvoří veškerý nízkopodlažní prostor doplněný o vysokopodlažní část nad posledním podvozkem a zvýšenou oblast v místě středního podvozku. Výška nízkopodlažní části a zároveň i nástupní hrany dveří nad temenem kolejnice je 350 mm, vysokopodlažní část je ve výšce 900 mm. Zvýšená ulička nad středním podvozkem je od temene kolejnice vzdálena 630 mm. Využitím velkého podílu nízké podlahy je zajištěna dostatečná rychlost výměny cestujících odpovídající současným moderním požadavkům na tento druh vozidla.

### **2.1.1. Dveře a okna**

Koncept předpokládá využití čtyř nástupních dveří pro cestující, po dvou na každém článku. Dveře jsou umístěny v nízkopodlažní části soupravy, což urychluje a zvyšuje komfort výměny cestujících. Tímto je také zajištěn zcela bezbariérový přístup do vozidla a tím zajištěna snadná manipulace s invalidními vozíky a kočárky. Dveře jsou čtyřkřídlé, skládací, při otevření se symetricky skládají po stranách dveřního otvoru. Tento typ dveří je zvolen vzhledem k rozměrovým omezením, která znemožňují využití dveří předsuvných. Všechny dveře jsou stejné následujících rozměrů: Šířka dveří je 1 300 mm, výška 1 970 mm.

Pro přístup strojvedoucího do kabiny slouží posuvné dveře umístěné v přepážce mezi kabinou pro cestující a kabinou strojvedoucího. Tato přepážka je umístěna na vysokopodlažní části za kabinou strojvedoucího. Není vyvedena jako pevná součást svařovaného skeletu, ale bude do skeletu vestavěna až po jeho dokončení.

Okna jsou tvořena jednoduchým sklem pružně lepeným z vnější strany skříně vozu. Jejich umístění s přesahem zajistí optické sjednocení okenního pásu a tím žádaný estetický účinek. Použití jednoduchého skla neposkytuje tak vysokou tepelnou izolaci, nicméně z charakteristiky provozu dochází k mnohem vyšším tepelným ztrátám při opakujícím se otevírání kabinových dveří, a tedy netřeba klást na okna tak vysoké požadavky. Některá okna jsou doplněna výklopnými větracími segmenty. Konkrétní rozměry jednotlivých oken nejsou směrodatné, okna budou vyrobená na míru dle výsledné dispozice a rozmístění nosných částí skeletu vozidla. Snahou je zajistit co nejmenší rozměrový rozptyl jednotlivých oken.

Okna na čelech článků budou vyrobená na míru z tvarovaného vrstveného skla a umožní strojvedoucímu dostatečný výhled z vozidla.

### **2.1.2. Sedadla**

Sedadla pro cestující budou dodána subdodavatelem. Jejich upevnění je realizováno pomocí šikmé vzpěry k bočnici skeletu vozidla, což zvětšuje prostor pro nohy cestujících či jejich zavazadla. Norma ČSN 28 1300 udává minimální rozměry sedadel samotných i minimální prostor potřebný k jejich umístění. Konkrétní rozmístění sedadel po přepravní

kabině je realizováno tak, aby byla zajištěna maximální dostupnost míst k sezení v obou výškových úrovních podlahy. Zároveň je potřeba zachovat dostatečný prostor pro pohyb cestujících a přístup k jednotlivým sedadlům, aby byla umožněna vysoká rychlost výměny cestujících. Většina sedadel je seskupena do dvojic, na konci zadního článku je pětice sedadel, z nichž prostřední je vyvedeno jako sklápěcí. Toto sklápěcí sedadlo usnadňuje přístup strojvedoucího k ovládacímu panelu pro řízení tramvaje ze zadního pomocného stanoviště. Další sklopná sedadla jsou umístěna v obou člancích v prostoru mezi dveřmi pro cestující. Tyto sedadla v zavřeném stavu poskytují větší prostor například při přepravě více kočárků najednou.

### 2.1.3. Invalidní vozík, kočárek

Pro přepravu invalidních vozíků a kočárků je vyhrazen prostor bez sedadel za druhými dveřmi v předním článku soupravy. Druhé dveře jsou vybaveny výklopnou nájezdovou plošinou, pro snadné najetí invalidního vozíku do tramvaje, kterou vyklopí strojvedoucí, pokud je přivolán stisknutím příslušného tlačítka. Jelikož je plošina vyklápěna manuálně strojvedoucím, je potřeba, aby byla umístěna co možná nejbližší kabiny strojvedoucího a tím byla minimalizována časová náročnost této operace.

Pokud je přepravováno více kočárků, popřípadě invalidních vozíků najednou, je možné zvětšit volný prostor složením sklápěcích sedadel do vertikální polohy. Kočárky mohou být takto přepravovány jak v předním, tak i v zadním článku soupravy.

## 2.2. Rozměrové ověření dle ČSN 28 0337

Následující kapitola je inspirována normou ČSN 28 0337 (19) odkud jsou čerpány i všechny použité rovnice.

Před započítáním konstruování skeletu samotného je potřeba ověřit, zda je vůbec reálné provedení tramvaje v navrhovaných rozměrech. Ověřuje se rozměrová vhodnost tak, aby bylo zamezeno kolizím tramvaje s vozidly projíždějícími po vedlejších kolejích či s budovami nebo jiným zařízením podél trati.

Obrys pro tramvajová vozidla je vztažná křivka v rovině kolmé k ose koleje, která udává dovolené vzdálenosti jednotlivých bodů skutečného povrchu vozidla od osy obrysu tramvajového vozidla a temene kolejnice. Obrys pro tramvajová vozidla je stanoven na základě průjezdného průřezu, což je stavební charakteristika kolejové tratě daná normou ČSN 28 0318.

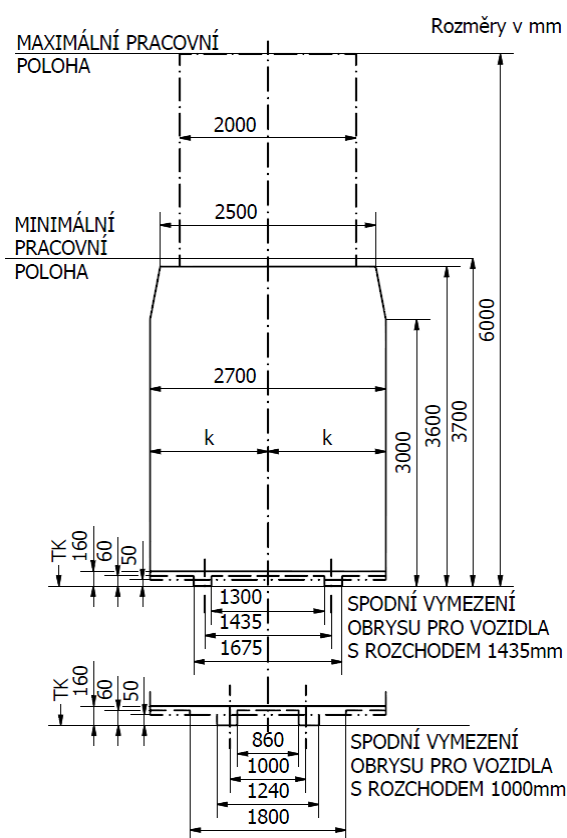
Rozměrové ověření se provádí ve dvou polohách:

- 1) V přímé koleji – vozidlo stojí v klidu na přímé vodorovné koleji, žádná jeho součást kromě směrových světel a zpětných zrcátek nesmí překročit obrys vozidla v přímé koleji.

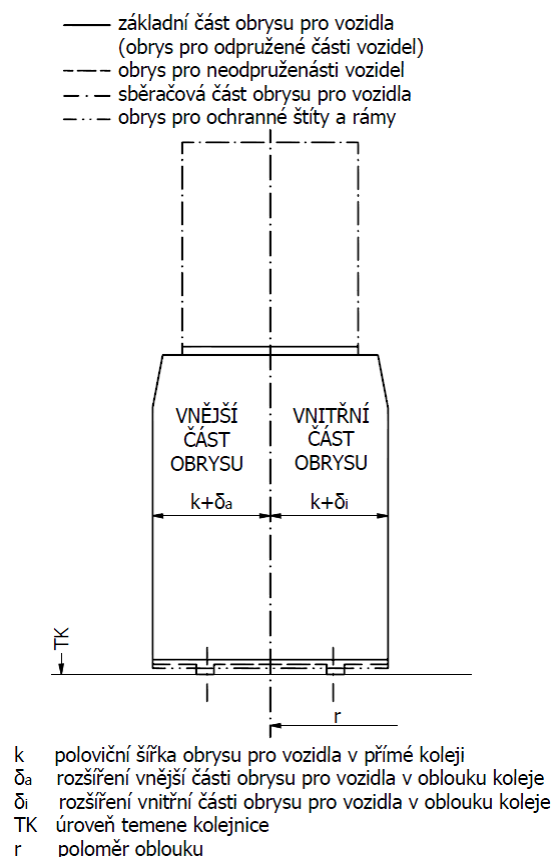
- 2) V oblouku – vozidlo stojí v klidu na vodorovném oblouku v nejnepříznivější poloze, žádná jeho součást kromě směrových světel a zpětných zrcátek nesmí překročit obrys vozidla v oblouku.

Obrys pro tramvajová vozidla v přímé koleji je platný též pro oblouky o poloměru 1 000 m a vyšším a je symetrický podle svislé osy obrysu vozidla. Obrys pro vozidla v přímé koleji je patrný z obrázku 10.

Obrys pro tramvajová vozidla v oblouku není symetrický, oproti obrysu vozidla v přímé koleji se rozšiřuje o hodnoty  $\delta_a$  a  $\delta_i$ , které jsou dány poloměrem oblouku a příslušností k vnitřní či vnější straně oblouku. Hodnoty  $\delta_a$  a  $\delta_i$  jsou zobrazeny v tabulce 5 a celý obrys na obrázku 11.



**Obrázek 10 – Obrys pro vozidla v přímé koleji s rozchodem 1 435 mm a 1 000 mm (19) - upraveno**



**Obrázek 11 – Obrys pro vozidla v oblouku koleje (19) - upraveno**

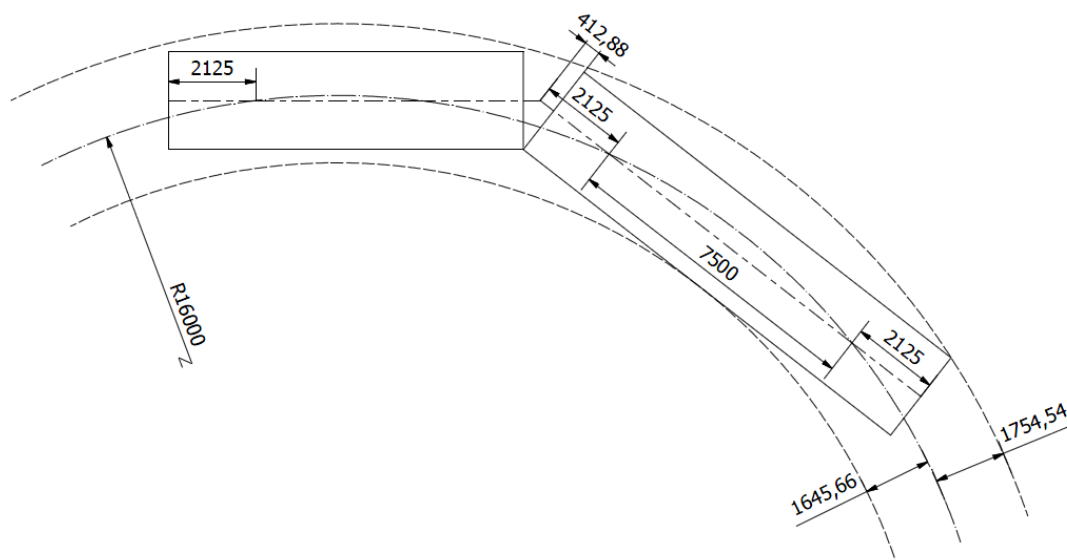
**Tabulka 5 – Rozšíření obrysu pro vozidla v obloucích koleje (19) - zkráceno**

Poloměr oblouku osy koleje $r$ m	Rozšíření vnější části obrysu pro vozidla v oblouku $\delta_a$ mm	Rozšíření vnitřní části obrysu pro vozidla v oblouku $\delta_i$ mm	Celková šířka obrysu pro vozidla v oblouku mm
20	650	310	3 660
22	600	280	3 580
25	530	235	3 465
30	440	185	3 325
35	380	150	3 230
40	330	125	3 155
45	290	105	3 095
50	260	85	3 045
75	165	35	2 900
100	115	10	2 825
150	65	5	1 770
200	45	0	2 745

Vyšetřován je nejmenší poloměr 20 m, vyžadováno je plné vyhovění normě. Dále byl zadavatelem vznesen požadavek na zajištění bezpečnosti průjezdu obloukem o poloměru 16 m. Tato hodnota již není normou ČSN 28 0337 přímo ošetřena a bylo dohodnuto, že při průjezdu obloukem o poloměru 16 m má být zajištěna pouze dostatečná rozměrová vůle v oblasti kloubového spojení obou článků bez ohledu na maximální hodnoty přesahu průjezdného profilu. Pro potřeby práce bude provedena kontrola přesahu průjezdného profilu pro  $r = 20$  m grafickou metodou a následně i výpočtem dle ČSN 28 0337. Poloměr  $r = 16$  m bude vyhodnocen pouze graficky.

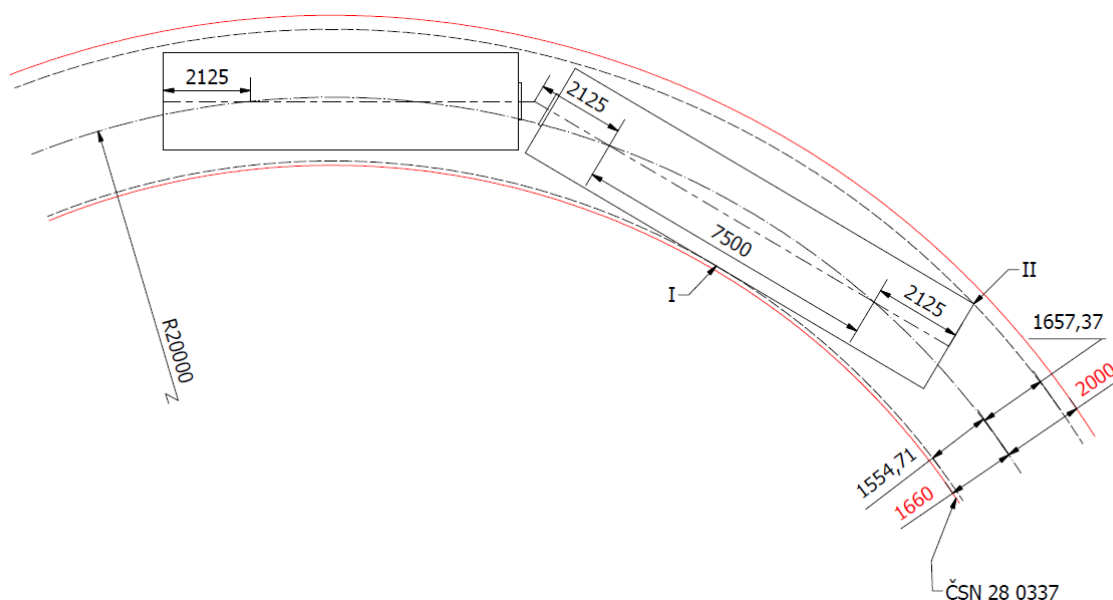
### 2.2.1. Grafická kontrola

Grafická kontrola je provedena zobrazením zjednodušených modelů článků tramvaje na ideální trať konstantního poloměru. V grafickém řešení jsou zanedbány výchylky způsobené rozvorem kol podvozků. Na základě grafického řešení jsou vytipována nebezpečná místa pro číselný výpočet. Grafické řešení pro oblouk poloměru 16 m je zobrazeno na obrázku 12.



**Obrázek 12 – vyšetření přesahu obrysu vozidla v oblouku  $r = 16$  m**

Z posouzení grafického řešení průjezdu obloukem o poloměru 16 m je získána minimální hodnota zkrácení skříně v oblasti kloubového spojení. Jedná se o hodnotu vzdálenosti, ve směru podélné osy skříně, mezi osou kloubového spojení a průsečíkem obrysů obou skříní na vnitřní straně oblouku. Při zkrácení skříní o tuto hodnotu by při průjezdu obloukem o poloměru 16 m došlo ke kontaktu příslušných hran na vnitřní straně oblouku. Minimální hodnota zkrácení  $\Delta L = 412,88$  mm.



**Obrázek 13 – Vyšetření přesahu obrysu vozidla v oblouku  $r = 20$  m**

Grafické řešení pro oblouk poloměru 20 m je patrné z obrázku 13. Výsledek je pozitivní, tedy, že skutečný průjezdný obrys vozidla leží uvnitř rozšířeného obrysu pro vozidlo dle ČSN 28 0337. Pro body I a II bude provedena početní kontrola.

## 2.2.2. Kontrola výpočtem

Nebezpečná místa (I, II) vytipovaná v grafickém řešení jsou početně ověřena výpočtem dle ČSN 28 0337.

### 2.2.2.1. Vnitřní vybočení

$$E_i = \frac{2el_0 - l_0^2}{2r} + d + \frac{p^2}{8r} + b \quad (1)$$

Kde  $E_i$  je Vnitřní vybočení – vzdálenost bodu povrchu vozidla v prostoru mezi otočnými čepy, měřená od osy obrysu pro vozidla směrem dovnitř oblouku koleje;

$e$  Poloviční vzdálenost otočných čepů;

$l_0$  Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od roviny příčného řezu v místě otočného čepu;

$r$  Poloměr oblouku;

$d$  Maximální možný radiální posuv otočného čepu ze střední polohy po vyčerpání všech možných vůlí při statické poloze

$p$  Rozvor podvozku;

$b$  Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od podélné osy vozidla.

### Podmínka pro vnitřní vzdálenost bodů povrchu vozidel

$$E_i \leq k + \delta_i \quad (2)$$

Kde  $k$  je Poloviční šířka obrysu pro vozidla v přímé koleji;

$\delta_i$  Rozšíření vnitřní části obrysu pro vozidla v oblouku koleje.

### 2.2.2.2. Vnější vybočení

$$E_a = \sqrt{r^2 + b^2 + l_s^2 - q^2 - e^2 + e^2 \cdot d_a^2 + d_a \cdot 2l_s \cdot \sqrt{r^2 - q^2} + 2b \cdot \sqrt{r^2 - q^2 - e^2} \cdot \sqrt{1 - d_a^2}} - r \quad (3)$$

Kde  $E_a$  je Vnější vybočení – vzdálenost bodu povrchu vozidla v prostoru vně otočných čepů, měřená od osy obrysu pro vozidla směrem vně oblouku;

$l_s$  Vzdálenost vyšetřovaného bodu povrchu vozidla od roviny příčného řezu vozidla procházející středem vzdálenosti otočných čepů;

$q$  Poloviční rozvor podvozku;

$d_a$  Poměrná vůle  $d_a = \frac{d}{e}$

### Podmínka pro vnější vzdálenost bodů povrchu vozidel

$$E_a \leq k + \delta_a \quad (4)$$

Kde  $\delta_a$  je Rozšíření vnější části obrysu pro vozidla v oblouku koleje.

**2.2.2.3. Vlastní výpočet místa I**

$$E_I = \frac{2 \cdot \frac{7\,500}{2} \cdot \frac{7\,500}{2} - \left(\frac{7\,500}{2}\right)^2}{2 \cdot 20\,000} + 0 + \frac{1\,900^2}{8 \cdot 20\,000} + \frac{2\,400}{2} = 1\,574,13 \text{ mm}$$

$$1\,574,13 \leq \frac{2\,700}{2} + 310 = 1\,660 \text{ mm}$$

Podmínka je splněna.

**2.2.2.4. Vlastní výpočet místa II**

$$E_a = \sqrt{\left(20\,000^2 + \left(\frac{2\,400}{2}\right)^2 + \left(\frac{7\,500}{2} + 2\,125\right)^2 - \left(\frac{1\,900}{2}\right)^2 - \left(\frac{7\,500}{2}\right)^2 + \dots + 0 + \right. \\ \left. + 0 \cdot \dots + 2 \cdot \left(\frac{2\,400}{2}\right) \cdot \sqrt{20\,000^2 - \left(\frac{1\,900}{2}\right)^2 - \left(\frac{7\,500}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{1-0}\right) - 20\,000} =$$

$$= 1\,635,25 \text{ mm}$$

$$1\,635,25 \leq \frac{2\,700}{2} + 650 = 2\,000 \text{ mm}$$

Podmínka je splněna.

Výsledek číselného řešení je pozitivní, tedy, že skutečný průjezdný obrys vozidla leží uvnitř rozšířeného obrysu pro vozidlo dle ČSN 28 0337. Normě je vyhověno a s navrhovanými rozměry je možné dále pokračovat v návrhu skříně.

### 3. Návrh svařovaného skeletu

V této kapitole je popsán vývoj konkrétního návrhu vnitřního ocelového skeletu společně s požadovanými kontrolami prováděnými v průběhu návrhu.

#### 3.1. Hrubý návrh skříně

Počáteční návrh základního tvaru a rozměrů konstrukce skříně tramvaje vychází ze zadaných jmenovitých vzdáleností otočných čepů podvozků a jejich umístění vzhledem k celkovému rozměru, dále pak na umístění a velikosti jednotlivých komponent. Tyto parametry jsou zřejmé z obrázku 9. Rozměry vychází z běžných hodnot používaných u souprav obdobné koncepce.

V rámci práce bude navržen pouze skelet předního článku. Skelet zadního článku od něj bude následně odvozen, jelikož se v podstatě jedná o jeho zkrácenou verzi. Návrhové výpočty jsou tedy provedeny pouze na skeletu předního článku.

##### 3.1.1. Materiál, polotovary

Základním použitým konstrukčním prvkem navrhovaného skeletu je ocelový tenkostěnný uzavřený profil obdélníkového průřezu. Požadavkem na konstrukci je minimalizovat počet rozměrových variací těchto profilů. Bylo dosaženo minimální hodnoty pěti rozměrových verzí, a to jsou 140x70x4, 100x70x4, 80x70x4, 70x60x4 a 70x35x4 všechny o stejné tloušťce stěny 4 mm. Dalším použitým typem profilu je I80. Tyto hodnoty byly inspirovány profily obvykle používanými v soudobých tramvajových konstrukcích, jako například u tramvají řady Vario.

Profily jsou doplněny o svařence z plechů tloušťky 10 mm a 6 mm. Jednotlivé plechové součásti budou vyrobeny technologií laserového či plasmového řezání z plechů příslušné tloušťky.

Základní použitý materiál je ocel S355J2 (ČSN: 11 503), často užívaná pro konstrukce tohoto typu. Tato ocel je vhodná pro svařování všemi obvykle používanými metodami. Mez kluzu pro tloušťku materiálu  $<16$  mm je  $R_e = 355$  MPa (20).

Svaření dílů jednotlivých segmentů i celého skeletu bude provedeno metodou MAG, na obtížněji dostupných místech doplněnou obloukovým svařováním obalenou elektrodou.

##### 3.1.2. Segmenty

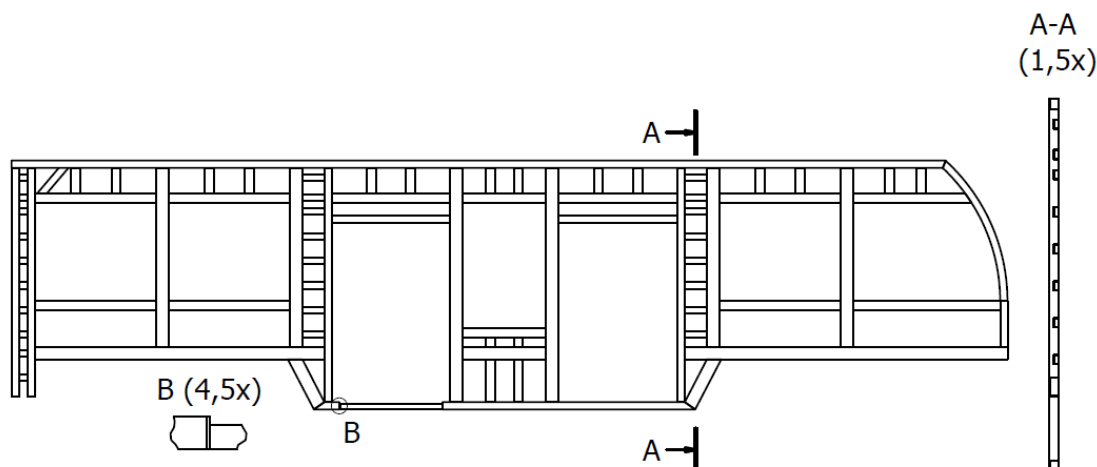
Již na počátku návrhu je počítáno s rozdělením celkové konstrukce skeletu na dílčí segmenty. Tyto dílčí segmenty budou při výrobě sestavovány a svařovány samostatně a až následně budou umístěny do požadované polohy a vzájemně spojeny. Touto metodikou je umožněno provést svaření jednotlivých segmentů, které jsou převážně rovinné, na rovné podložce a až následně je jako celky přemístit do požadovaných poloh. Takto je zajištěna mnohem vyšší geometrická přesnost celého skeletu. Jednotlivé segmenty jsou: pravá bočnice, levá bočnice, podlaha, střecha a čelnice.



V následujících bodech jsou podrobněji popsány a zobrazeny jednotlivé segmenty skeletu tak, jak budou svařeny a připraveny k finálnímu sestavení a svaření celého skeletu.

### 3.1.2.1. Bočnice

Hlavní nosné sloupky a podélníky bočnice jsou tvořeny profily 140x70x4, příčky jsou tvořeny profily 100x70x4 a na méně namáhané prvky jsou použity profily 80x70x4. Celý základní návrh je tvořen pouze ze svislých a vodorovných profilů, které budou až následně doplněny o vhodné výztuže a zavětrování.



Obrázek 14 – Pravá bočnice

Na bočnici se nachází několik klíčových míst, které bylo třeba zhodnotit a vhodně navrhnout, aby dosahovaly požadovaných vlastností.

Prvním z těchto míst je kanál pro elektrické vodiče vedoucí z technologie umístěné na střeše k trakčnímu podvozku. Tento kanál musí být umístěn v blízkosti daného podvozku a musí poskytovat dostatečný prostor pro vedení a ohyb vodičů. Toto je vyřešeno zdvojením sloupku v místě přechodu nízkopodlažní a vysokopodlažní části. Oba sloupky jsou vzájemně spojeny profily 70x35x4, orientovanými delší stranou ve svislé poloze, čímž je zajištěn dostatečný prostor kanálu 240x35 mm. Jelikož se zdvojený sloupek jeví jako vhodné a pevné napojení výškového přechodu podlah, tak je využit ve všech těchto místech bez ohledu na požadavek přítomnosti kanálu, tedy i nad běžným podvozkem a po obou stranách skříně.

Druhým klíčovým místem je umístění výklopné nájezdové plošiny pro invalidní vozíky. V tomto místě je nutno snížit výšku spodního podélného profilu tak, aby bylo dosaženo jednotné výsledné výšky nástupní hrany, včetně namontované plošiny, u všech čtyř dveří. Toto snížení je provedeno přerušením podélného profilu, přivařením čel z 6 mm plechu na jeho konce a následným umístěním profilu 70x60x4 mezi tyto čela.

V zadní části předního článku je třeba dostatečné tuhosti skeletu a zajištění přenosu síly od zavěšeného zadního článku do celého skeletu článku předního. To je zajištěno zdvojením posledního sloupku, který navazuje na čelnici podrobněji popsanou v příslušné části této zprávy. Navržená bočnice je zobrazena na obrázku 14.

Levá bočnice je shodná se stranou protilehlou, pouze je navíc doplněna o vodorovné příčky po celé délce, bez přerušení pro dveřní otvory.

### 3.1.2.2. Podlaha

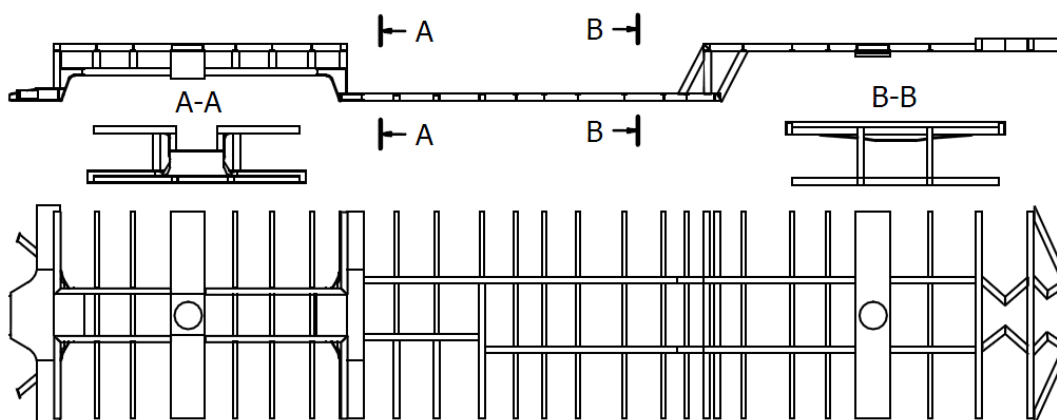
Podlaha je nejkomplicovanějším segmentem, k jehož výrobě je potřeba využít přípravků umožňujících ustavení jednotlivých profilů ve více rovinách. Podlahu lze rozdělit na čtyři samostatné podčásti tvořené z profilů, které v místech výškových přechodů a nad podvozky propojují plechové příčníky.

Část podlahy před příčnickem čelního podvozku je rovinná, tvořena profily 140x70x4 a 80x70x4. Jsou zde umístěny dvě řady šikmých profilů, které slouží jako deformační elementy. Ty v případě čelního nárazu zaručí maximální deformaci právě na čele skeletu.

Druhá část podlahy překlenuje prostor mezi příčnickem čelního podvozku a příčnickem oddělovujícím podestu nad středním podvozkem. Tato část obsahuje přechod mezi vysokou a nízkou podlahou. Výztuže výškového přechodu, které zasahují do prostoru kabiny pro cestující, jsou využity jako opora pro schůdky spojující obě úrovně podlahy. V této části se také nachází vybrání pro umístění výklopné nájezdové plošiny pro invalidní vozíky. Toto vybrání si vyžádalo přerušení podélného, takzvaného páteřového, nosníku a posunutí jeho části mimo oblast vybrání. Příčné nosníky I80 v oblasti snížení jsou nahrazeny uzavřenými profily 70x60x4 postavenými na delší stranu tak, aby navazovaly na snížený nosník v pravé bočnici.

Dvě části podesty nad středním podvozkem sestávají ze dvou úrovní. Po stranách jsou vysokopodlažní a uprostřed tvoří uličku o střední výšce podlahy. Přední část podesty je napojena na přechodový střední příčník a na prohnutý příčník středního podvozku, druhá část leží mezi příčnickem středního podvozku a příčnickem kloubového spojení na konci článku.

Navržený segment podlahy je zobrazen na obrázku 15.

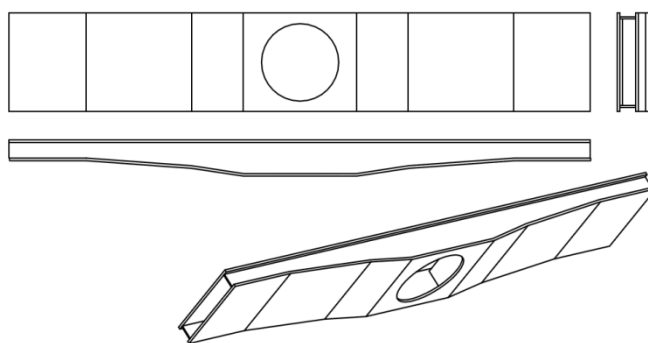


Obrázek 15 – Podlaha

### 3.1.2.3. Příčníky

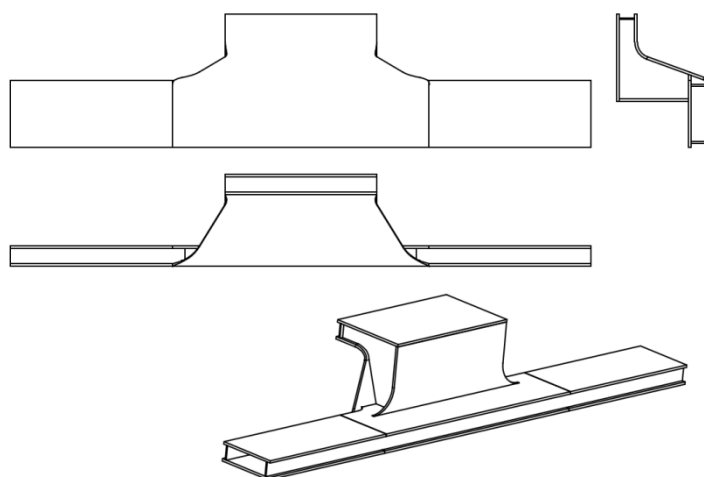
Příčníky jsou svařence z plechů tloušťky 6 mm a 10 mm umístěné nad podvozky a v namáhaných míst výškových přechodů podlahy. Svařované příčníky poskytují vyšší tuhost, než kdyby byla daná místa tvořena pouze nosníky.

Příčník čelního podvozku (Obrázek 16) je kvádrotvého tvaru s mírně se zužujícími okraji. V jeho středu jsou kruhovitá vybrání pro uložení těla otočného čepu podvozku. Tento příčník zajišťuje přenos sil od předního trakčního podvozku na celý skelet.



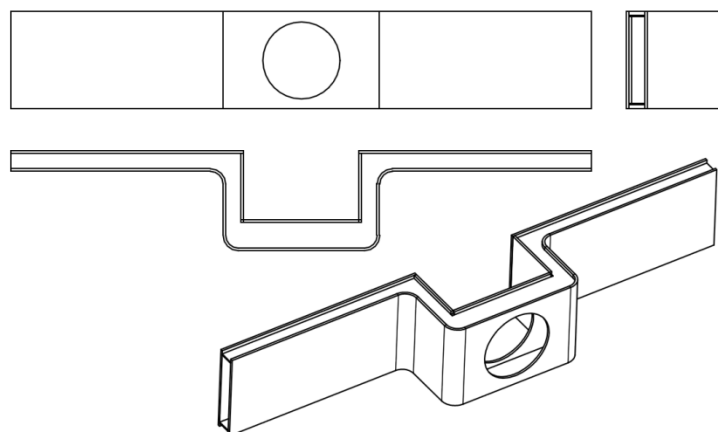
Obrázek 16 – Příčník čelního podvozku

Střední příčník (Obrázek 17) zajišťuje dostatečně tuhý přechod mezi nízkopodlažní částí a podestou středního podvozku. Příčník je tvořen širší kvádrotvitou částí, na úrovni nízké podlahy, z níž vybíhá zahnutý výběžek rozměrově navazující na uličku v podestě. Tento výběžek zároveň utváří schod rozdělující nízkou podlahu od podlahy uličky.



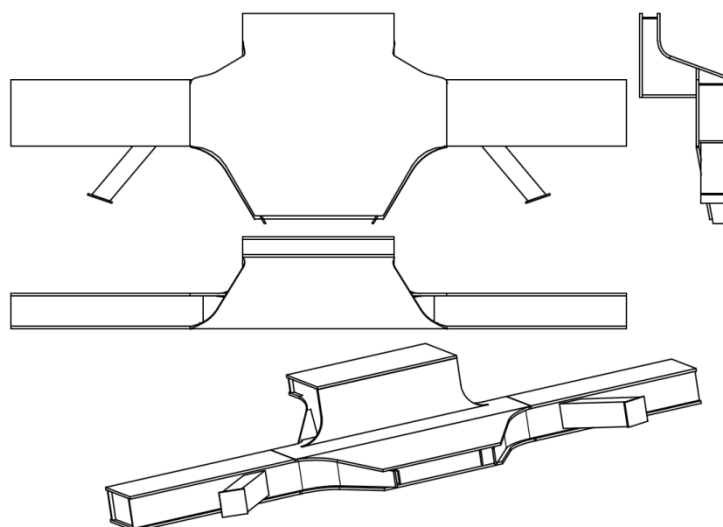
Obrázek 17 – Příčník střední

Příčník středního podvozku (Obrázek 18) má tvar obráceného písmene  $\Omega$  a kopíruje příčný profil podesty. V jeho středu jsou kruhovitá vybrání pro uložení otočného čepu podvozku. Příčník slouží k přenosu sil od středního běžného podvozku na celý skelet.



Obrázek 18 – Příčník středního podvozku

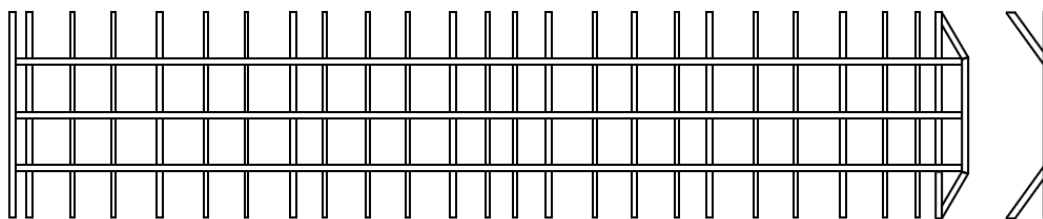
Příčník kloubu (Obrázek 19) je ve své podstatě střední příčník doplněný o druhý výstupek na protilehlém konci, na který se navaří ložiskový domek kloubového spojení. Příčník je dále doplněn o dorazy omezující minimální poloměr oblouku. Tyto dorazy jsou bezpečnostním prvkem, na kterém primárně dojde k deformaci při podkročení minimálního poloměru projížděného oblouku a zajistí, že deformace se nepřeneseme do bočnice skeletu. Zároveň vymezují minimální prostor mezi odpovídajícími si bočnicemi předního a zadního članku pro složení krycího měchu kloubového spojení.



Obrázek 19 – Příčník kloubu

#### 3.1.2.4. Střecha

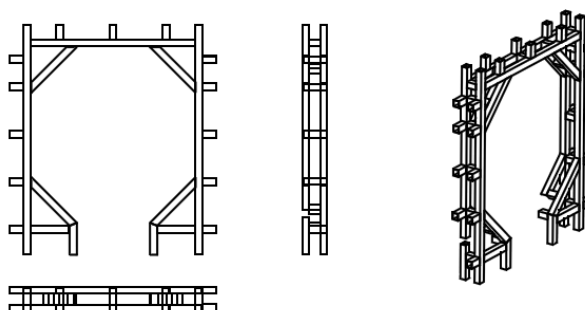
Střecha, patrná z obrázku 20, je pouze pravoúhlou konstrukcí tvořenou třemi podélnými nosníky 80x70x4 vzájemně spojenými profily I80. Na podélné nosníky budou upevněny střešní kontejnery s technologií. Kontakt střechy a bočnice je zpevněn šikmými výztuhami z profilu 80x70x4 mezi postranními podélnými nosníky střechy a sloupky bočnice v místě horního lemu oken. Na konci članku v místě čelnice jsou příčné nosníky, obdobně jako u bočnic, zdvojeny.



Obrázek 20 – Střecha

### 3.1.2.5. Čelnice

Čelnice (Obrázek 21) zdvojuje sloupky na zadním lemu skeletu a zužuje prostor vymezený pro průchod mezi články. Zdvojením sloupků, jejich provázáním a uchycením co nejbližší k ložiskovému domku kloubového spoje je zajištěna vyšší tuhost a schopnost rozložit síly od zavěšeného článku do celé konstrukce skeletu. Čelnice určuje tvar průchodu mezi články a je na ni přichycen krycí měch.



Obrázek 21 - Čelnice

## 3.2. Návrhový výpočet a návrh vyztužení

Pro prvotní výpočet je konstrukce zatížena maximálním užitečným zatížením od cestujících v přepravním prostoru, dále je aplikováno zatížení od technologie, která bude umístěna na střeše vozu, o předpokládané přibližné hmotnosti  $m_{ts} = 2\,500$  kg. Zohledněna je také technologie v zadní části kabiny strojvedoucího o hmotnosti  $m_{tk} = 1\,000$  kg a hmotnost strojvedoucího a dalšího vybavení jeho kabiny v hodnotě  $m_k = 250$  kg. V místě kloubového spojení je aplikována svislá síla  $F_z = 70$  kN reprezentující zatížení od zadního článku. V neposlední řadě je uvažována vlastní tíha konstrukce a zatížení tlakovou silou  $F = 250$  kN působící na čela ve směru podélné osy skeletu.

### 3.2.1. Užitečné zatížení předního článku dle ČSN 28 1300

V této podkapitole je vypočteno maximální užitečné zatížení předního článku pomocí rovnic uvedených v normě ČSN 28 1300 (21).

Dle půdorysného nákresu (Obrázek 22) je vypočtena celková užitečná plocha pro cestující  $S_u = 16,07$  m<sup>2</sup>.

Užitečná plocha pro sedící cestující  $S_{sed} = 8,92$  m<sup>2</sup> je taktéž určena z půdorysného nákresu (Obrázek 22).

Užitečná plocha pro stojící cestující  $S_{st}$  je vypočtena:

$$S_{st} = S_u - S_{sed} = 16,07 - 8,92 = 7,15 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Obsaditelnost vozidla  $N$  se určí dle vztahu:

$$N = N_{sed} + 5 \cdot S_{st} = 23 + 5 \cdot 7,15 \cong 58 \quad (6)$$

Kde  $N_{sed}$  je Celkový počet míst k sezení

Maximální obsaditelnost vozidla  $N_{max}$  je dána vztahem:

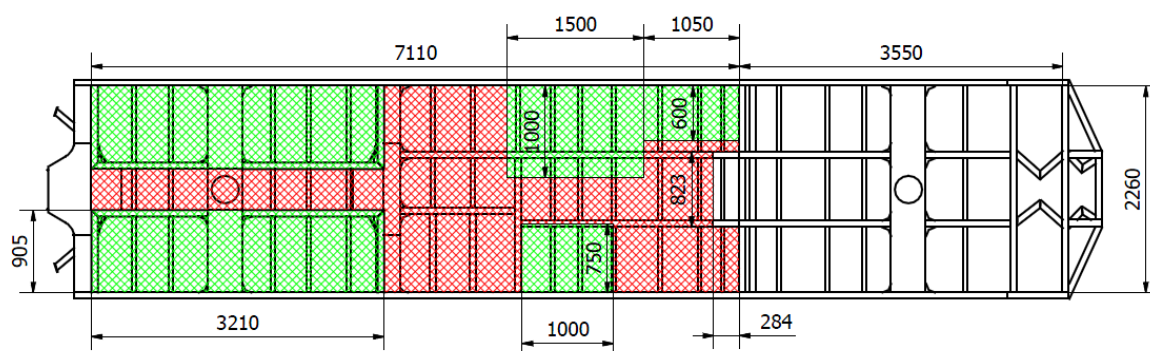
$$N_{max} = N_{sed} + 8 \cdot S_{st} = 23 + 8 \cdot 7,15 \cong 80 \quad (7)$$

Užitečné zatížení vozidla  $G$  se určí za předpokladu průměrné hmotnosti cestujícího 70 kg dle vztahu:

$$G = N \cdot 0,7 = 58 \cdot 0,7 = 40,6 \text{ kN} \quad (8)$$

Maximální užitečné zatížení vozidla  $G_{max}$  je určeno dle vztahu:

$$G_{max} = N_{max} \cdot 0,7 = 80 \cdot 0,7 = 56 \text{ kN} \quad (9)$$



Obrázek 22 – Užitečná plocha pro sedící (zelená) a pro stojící (červená) cestující

### 3.2.2. Návrhový výpočet

Tato podkapitola se zabývá přípravami 3D modelu na MKP výpočet a provedením výpočtu samotného. Jsou zde popsány úpravy 3D modelu skeletu a zjednodušení aplikovaná v zájmu zvýšení rychlosti výpočtu. Dále jsou rozebrány všechny parametry zadání výpočtu do programu ANSYS Workbench a vyhodnoceny výstupy. V zájmu zkrácení této zprávy je veškerá podrobnější grafická dokumentace tohoto výpočtu umístěna v příloze A.

#### 3.2.2.1. Parametry materiálu

Základní charakteristiky defaultního materiálu "Structural Steel" jsou v programu ANSYS upraveny dle přehledu vlastností oceli S355J2 (ČSN: 11 503) (20). Použité parametry jsou vypsány v tabulce 6.

**Tabulka 6 – Základní parametry materiálu pro výpočet (20)**

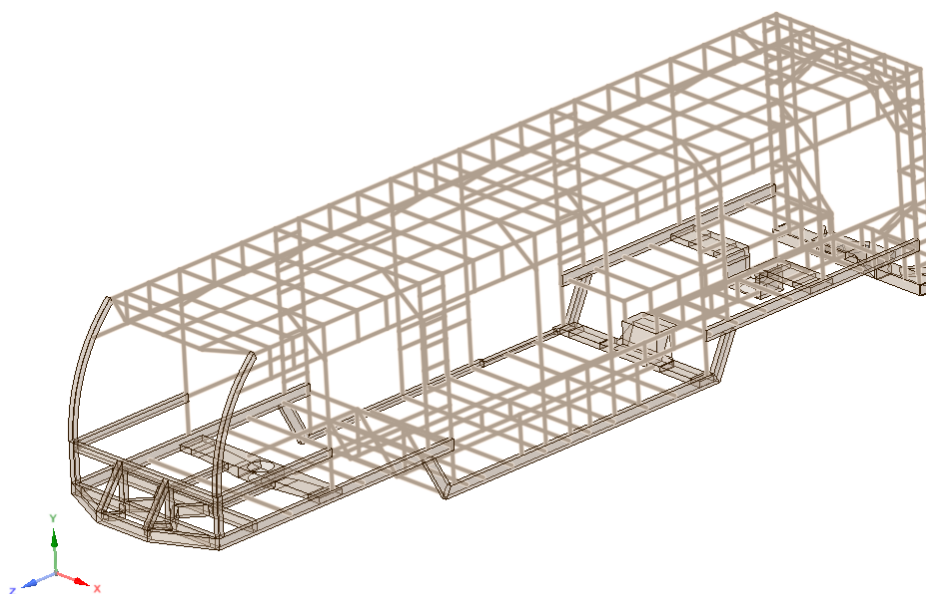
Mez kluzu v tahu/ Tensile Yield Strength	355 MPa
Mez kluzu v tlaku/ Compressive Yield Strength	355 MPa
Mez pevnosti v tahu/ Tensile Ultimate Strength	470 MPa

**3.2.2.2. Geometrie**

Pro zajištění přijatelné rychlosti výpočtu a omezení podrobností v irelevantních místech modelu je potřeba 3D model vhodně upravit a zjednodušit. K těmto úpravám je použit program ANSYS SpaceClaim 18. Požadavky na výpočtový model jsou inspirovány normou ČSN EN 15227, kde je vyžadováno detailnější vymodelování deformačních oblastí na čele vozu s možností vytvoření modelu zbývajících částí skeletu s nižší přesností. Na základě tohoto principu je zvoleno užití prvků "shell" pro přesnější nahrazení stěn profilů v přední části článku a prvků "beam" pro nahrazení zbývajících profilů skeletu pouze jejich osou s danými vlastnostmi. Většina rádiusů a zaoblení je potlačena. Tento model vykazuje dostatečnou přesnost pro statický výpočet soudržnosti konstrukce požadovaný pro ověření konceptu skeletu.

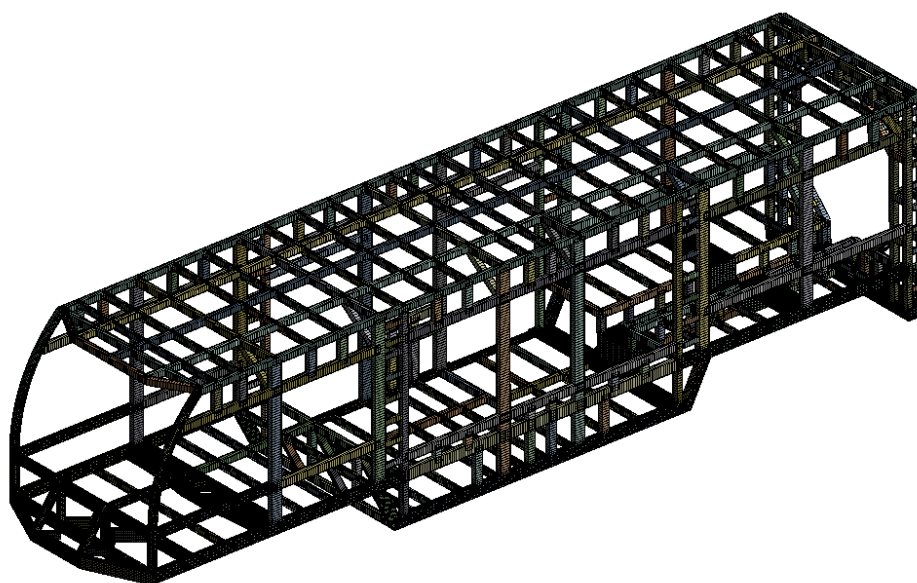
Prvky "shell" jsou použity také na celý obvod podlahy, neboť ne všechny podlahové prvky mají osy v jedné rovině, což by komplikovalo jejich napojení pouze k ose obvodového profilu. Tímto je zajištěna možnost napojení podlahových prvků na celém rozsahu šířky bočního profilu. Zároveň je také umožněno skutečnosti bližší napojení příčníků na boční profily. Zjednodušený model pro výpočet je patrný z obrázku 23.

Kontakty mezi jednotlivými součástmi modelu jsou vytvořeny automaticky na základě sdílené topologie celého modelu z programu ANSYS SpaceClaim.

**Obrázek 23 – Návrhový výpočet, zjednodušený model**

### 3.2.2.3. Sít'

Sít' modelu je vytvořena tak, aby nebyl překročen limit uzlů pro akademickou licenci programu ANSYS, což je díky užití prvků "beam" snadno dosažitelné. Pomocí příkazu "sizing" je velikost elementů pro všechny prvky "shell" nastavena na 20 mm, velikost elementů pro všechny prvky "beam" je nastavena na 30 mm. Sít' má 79 511 elementů napojených pomocí 89 982 uzlů. Vzhledem k celkovým rozměrům modelu se sít' jeví jako dostatečně jemná pro potřebu požadovaných výpočtů. V přední části tvořené pouze prvky "shell" je takto zajištěna dostatečná jemnost, zároveň eliminací téměř veškerých zaoblených tvarů je dosaženo tvarově pravidelných elementů, které zajistí vyšší spolehlivost výpočtu. Sít' modelu je zobrazena na obrázku 24.



Obrázek 24 – Návrhový výpočet, sít'

### 3.2.2.4. Okrajové podmínky

Na reálném voze podvozky zajišťují vertikální oporu pro celou konstrukci a vedení kolejí omezuje příčný pohyb. Podvozky jsou uvažovány odbrzděné, bez tření, a tedy volné pro posuv ve směru osy koleje. Podvozkové čepy umožňují rotaci kolem svislé osy a částečný náklon kolem osy příčné pro zajištění sjízdnosti výškových oblouků. Vzhledem k tomu, že parametry podvozků nejsou známy, není uvažováno vypružení, které může částečně ovlivňovat volnost i v jiných směrech. Tyto účinky jsou na modelu reprezentovány vazbami "Remote Displacement" umístěnými do kruhových vybrání pro otočný čep podvozku v obou podvozkových příčnicích. Vazby odebírají posuvy v osách X a Y a rotaci kolem osy Z.

Omezení pohybu skeletu v podélné ose modelu, proti působící síle  $F$ , zajišťuje podpora "Displacement" s odebranou volností v ose Z umístěná v místě napojení ložiskového domku na příčník kloubu.

Podélná zatěžující síla  $F = 250$  kN ve směru -Z je umístěna na čele skeletu, konkrétně na ploše stěny nejvíce vystupujícího čelního profilu ve výšce vysoké podlahy. Tento profil



tvorí oblast nárazníku a je místem prvotního kontaktu skeletu s potenciální překážkou (při zanedbání laminátové kapoty).

Maximální užitečné zatížení  $G_{max} = 56 \text{ kN}$  ve směru -Y je aplikováno na osy příslušných prvků "beam" a hrany svařenců nacházejících se v oblasti pro přepravu cestujících.

Zatížení od technologie na střeše reprezentuje síla  $F_{ts} = 25 \text{ kN}$  ve směru -Y, která odpovídá předpokládané hmotnosti zařízení  $m_{ts} = 2\,500 \text{ kg}$ . Síla je aplikována na dva postranní podélné nosníky segmentu střechy.

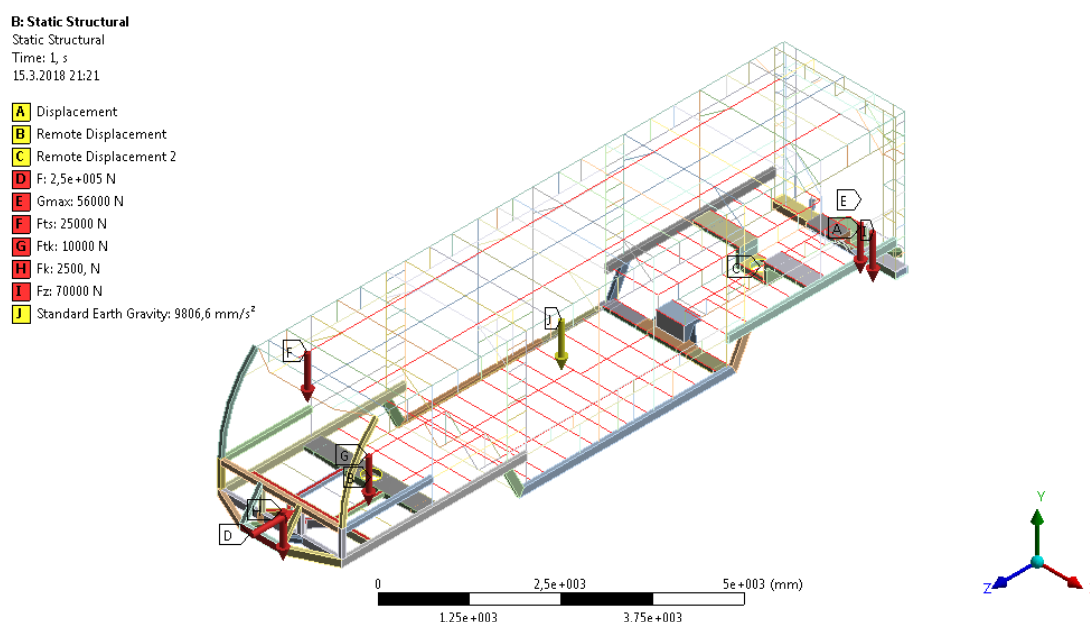
Zatížení od technologie v kabině strojvedoucího způsobuje síla  $F_{tk} = 10 \text{ kN}$  ve směru -Y odpovídající předpokládané hmotnosti zařízení  $m_{tk} = 1\,000 \text{ kg}$ . Síla je aplikována na osy profilů v zadní části kabiny strojvedoucího.

Zatížení hmotností strojvedoucího a dalšího vybavení kabiny zastupuje síla  $F_k = 2,5 \text{ kN}$  ve směru -Y, která odpovídá předpokládané hmotnosti  $m_k = 250 \text{ kg}$ . Síla je aplikována na horní plochy profilů v přední části kabiny strojvedoucího.

Síla  $F_z = 70 \text{ kN}$  od zavěšeného zadního članku ve směru -Y je umístěna do místa napojení ložiskového domku na příčník kloubu.

Jako poslední, ne však méně důležité, je gravitační zrychlení "Standard Earth Gravity" zohledňující vlastní tíhu konstrukce ve směru -Y.

Rozmístění podpor a zatížení na modelu je patrné z obrázku 25.



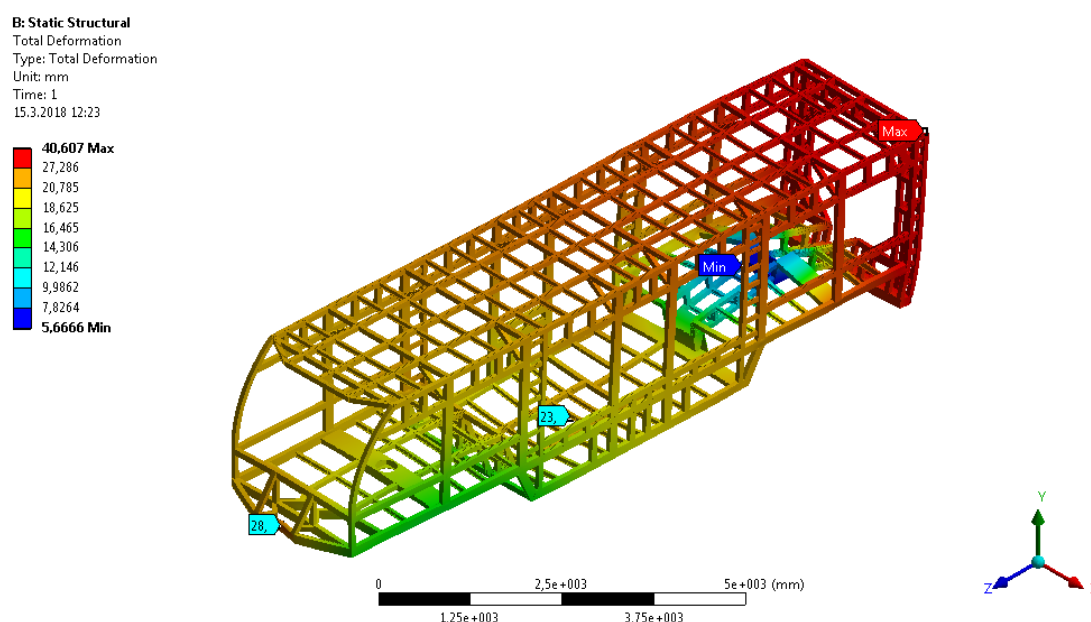
Obrázek 25 – Návrhový výpočet, okrajové podmínky

### 3.2.2.5. Výsledky návrhového výpočtu

V návrhovém výpočtu jsou vyhodnoceny tyto parametry: celková deformace, axiální síly a ohybový moment v prvcích "beam".

Na základě těchto tří parametrů je posouzena celá konstrukce a zhodnocena potenciální vhodnost vyztužení konkrétních míst.

Celková deformace konstrukce nabývá největší hodnoty (cca 40 mm) na zadní části članku v oblasti horní části čelnice. To zapříčiňuje nedostatečná tuhost podesty středního podvozku, která se deformuje mnohem snáze, než přímé nosníky v bočnicích a střeše. Je patrné, že celé provedení čelnice je dostatečně tuhé, ale doplácí na podstatně poddimenzované uchycení příčnicku středního podvozku. Dalším místem s vyšší hodnotou celkové deformace (cca 28 mm) je čelní plocha, na kterou působí podélná síla  $F$ . Tento údaj však není příliš relevantní, neboť v případě kolize dojde ke kontaktu s jinou plochou, a tedy nedojde k takovému vtlačení stěny pouze ve střední části nosníku, ale kolizní síla se ve větší míře rozloží na postranní šikmé profily. Vyšší deformací (cca 22 mm) je postižena oblast nízké podlahy ve středu članku. To je způsobeno jednak maximálním průhybem celého skeletu mezi příčníky podvozků ale také průhybem samotné mřížky podlahy. Nejvýznamnější oblastí se tedy jeví podesta středního podvozku, kde dochází k velké změně hodnot deformace na relativně krátké vzdálenosti, tedy zajisté i k velkému namáhání především nosníků napojujících se na příčník středního podvozku. Rozložení hodnot celkové deformace na skeletu je zobrazeno na obrázku 26.

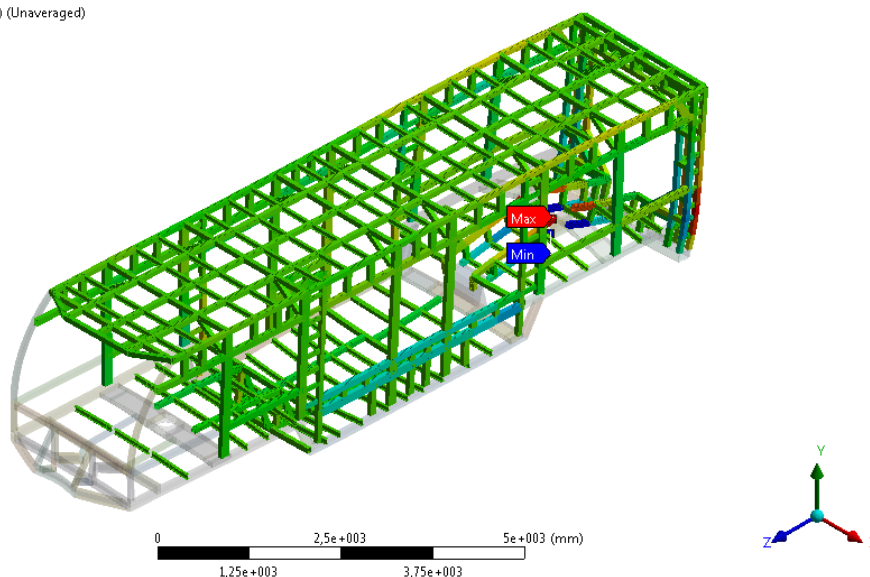


**Obrázek 26 – Návrhový výpočet, celková deformace**

Maximální i minimální extrémní hodnoty axiálních sil jsou, jak již bylo předpovězeno z výsledků celkové deformace, v nosnících napojujících se na příčník středního podvozku. Dalším místem s výraznějšími axiálními silami v nosnících je oblast posledních sloupků v obou bočnicích na úrovni čelnice. Zde dochází k jejich namáhání tahem způsobenému snahou příčnicku kloubu rotovat směrem dolů kvůli jeho tvaru a rozložení sil na něj působících. Rozložení hodnot axiálních sil je patrné z obrázku 27.

**B: Static Structural**  
 Axial Force  
 Type: Directional Axial Force(X Axis) (Unaveraged)  
 Unit: N  
 Solution Coordinate System  
 Time: 1  
 15.3.2018 12:24

1,3298e5 Max  
 1,0041e5  
 67844  
 35275  
 2705  
 -29865  
 -62434  
 -95004  
 -1,2757e5  
 -1,6014e5 Min

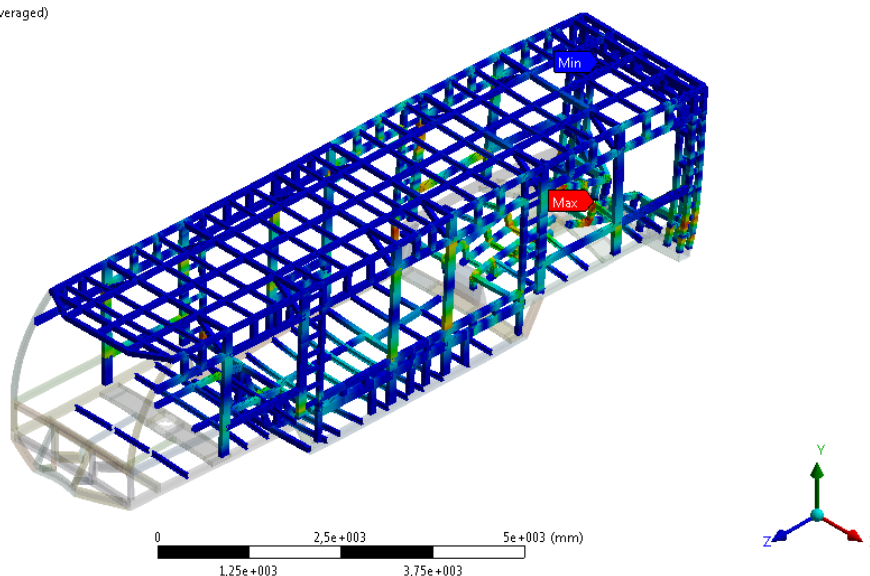


**Obrázek 27 – Návrhový výpočet, axiální síly**

Z vyhodnocení maximálních ohybových momentů (Obrázek 28) je patrné, že nejvyšší hodnoty se nachází opět na nosnících napojujících se na příčnici středního podvozku. Dále jsou zvýšené hodnoty na sloupcích pravé bočnice v místech otvorů pro dveře, kde jsou vynechány podélné příčky, a tak přerušen přenos podélné síly. Vzhledem k tomu, že v podstatě nic nebrání deformaci v prostoru dveří, dochází k nadměrnému namáhání v ohybu všech sloupků na této straně skeletu.

**B: Static Structural**  
 Total Bending Moment  
 Type: Total Bending Moment (Unaveraged)  
 Unit: N-mm  
 Time: 1  
 15.3.2018 12:25

1,0805e7 Max  
 4,9973e6  
 4,3726e6  
 3,748e6  
 3,1233e6  
 2,4987e6  
 1,874e6  
 1,2494e6  
 6,2474e5  
 96,923 Min



**Obrázek 28 – Návrhový výpočet, ohybový moment**

Jako nejvíce nebezpečné místo se kvůli vysokým axiálním silám, ohybovým momentům v nosnících a prudké změně deformovaného tvaru jeví oblast v okolí příčnicku středního podvozku. Především v této oblasti je potřeba zvýšit tuhost a odlehčit nejvíce zatíženým

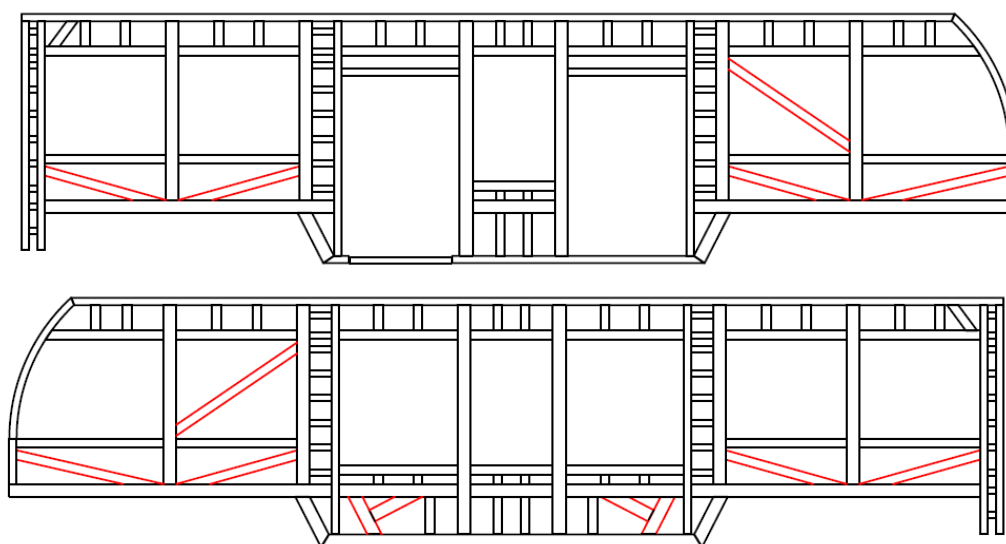
nosníkům. Dále je nutné zajistit větší rozložení reakčních sil od příčníků podvozků do celého skeletu a zvýšit tuhost konstrukce nízké podlahy ve středu článku. V neposlední řadě pak zlepšit přenos podélných sil v pravé bočnici.

### 3.2.3. Návrh vyztužení

V následujících podkapitolách jsou podrobněji rozepsány úpravy provedené na jednotlivých segmentech na základě návrhového výpočtu.

#### 3.2.3.1. Vyztužení bočnic

K lepšímu rozložení sil v oblasti příčníků podvozků jsou do bočnic přidány šikmé výztuhy z profilu 100x70x4 po stranách příčníků. Výztuhy jsou také umístěny do prostoru za bočním oknem kabiny řidiče, neboť v tomto prostoru se nachází pouze technologie a otvor v bočnici neslouží jako okno. Na levé bočnici (bez dveří) jsou přidány profily pro zpevnění přechodu nízké a vysoké podlahy, což zvýší tuhost tohoto navázání, které je klíčové pro přenos podélných sil ve výšce podlahy. Rozmístění výztuh v bočnicích je zřejmé z obrázku 29.

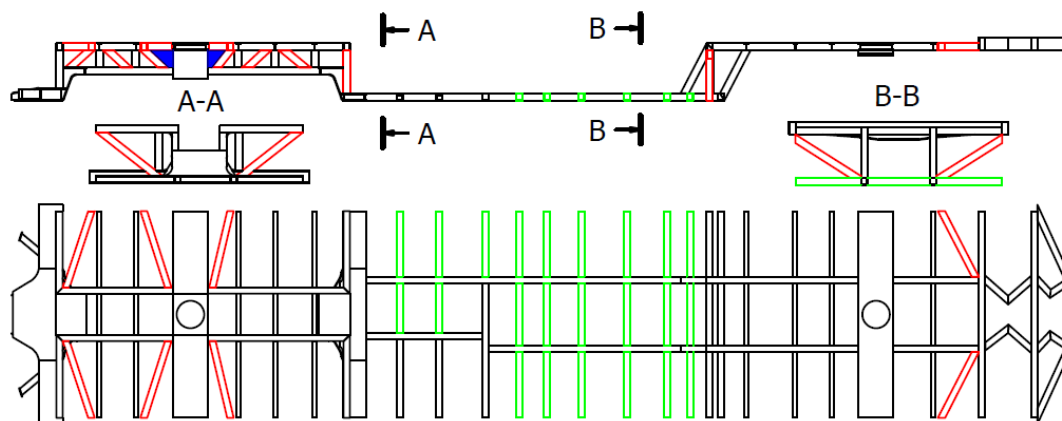


Obrázek 29 – Bočnice s vyznačenými výztuhami (červená)

#### 3.2.3.2. Vyztužení podlahy

Nejvýraznější změnou v oblasti nízké podlahy je nahrazení profilů I80 uzavřenými tenkostěnnými profily 80x70x4. Dále je podlaha na mnoha místech doplněna o výztuhy z profilu 80x70x4. V přední části vysoké podlahy jsou umístěny dvě šikmé výztuhy, které zajistí lepší rozložení sil od deformačních elementů do celé šířky skeletu. V místě obou výškových přechodů podlahy jsou umístěny šikmé vzpěry pro zvýšení tuhosti těchto míst a minimalizování příčného průhybu podlahy. Nejvíce je vyztužena oblast podesty nad středním podvozkem. Po stranách snížené uličky je umístěno několik příhrad, které zajišťují větší soudržnost mezi podlahou uličky a horními profily zvýšené podesty. Dále je vložen zpevňující plech tloušťky 4 mm z každé strany příčniku středního podvozků do prostoru mezi jeho stěnou a přilehlou výztuhou. Tyto úpravy minimalizují možnost podélného ohybu celé

ulíčky. Do horní plochy podest jsou přidány další výztuhy pro zlepšení rozložení sil od příčniku středního podvozku. Rozmístění výztuh v podlaze je znázorněno na obrázku 30.



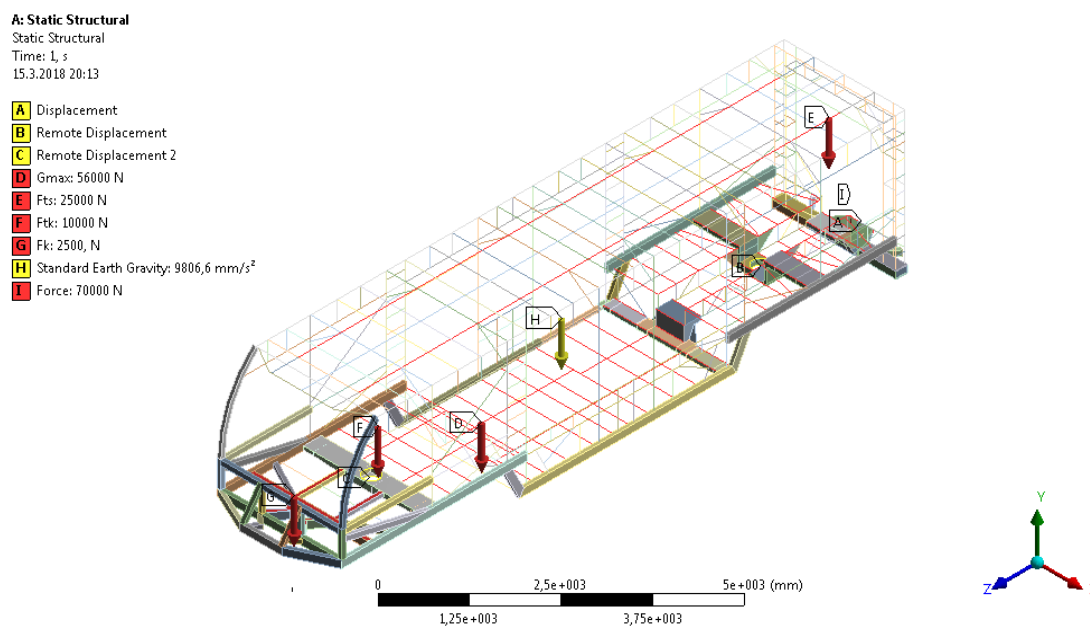
**Obrázek 30 – Podlaha s vyznačeným vyztužením (červená, plech modrá) a změnou typu profilů (zelená)**

### 3.3. Ověřovací výpočet

Pro ověření navržených úprav je proveden druhý MKP výpočet v programu ANSYS Workbench.

Všechny parametry výpočtu jsou shodné s výpočtem návrhovým (viz 3.2.2) s jedinými rozdíly a to, že je použit model doplněný o navržené výztuhy a skelet není zatížen podélnou silou  $F$ . Síla  $F$  není ověřována, neboť se nejedná o provozní zatížení, ale o mezní stav, který je testován v následném výpočtu. V zájmu zkrácení zprávy je veškerá podrobnější grafická dokumentace tohoto výpočtu umístěna v příloze B.

Okrajové podmínky výpočtu jsou patrné z obrázku 31.



**Obrázek 31 – Ověřovací výpočet, okrajové podmínky**

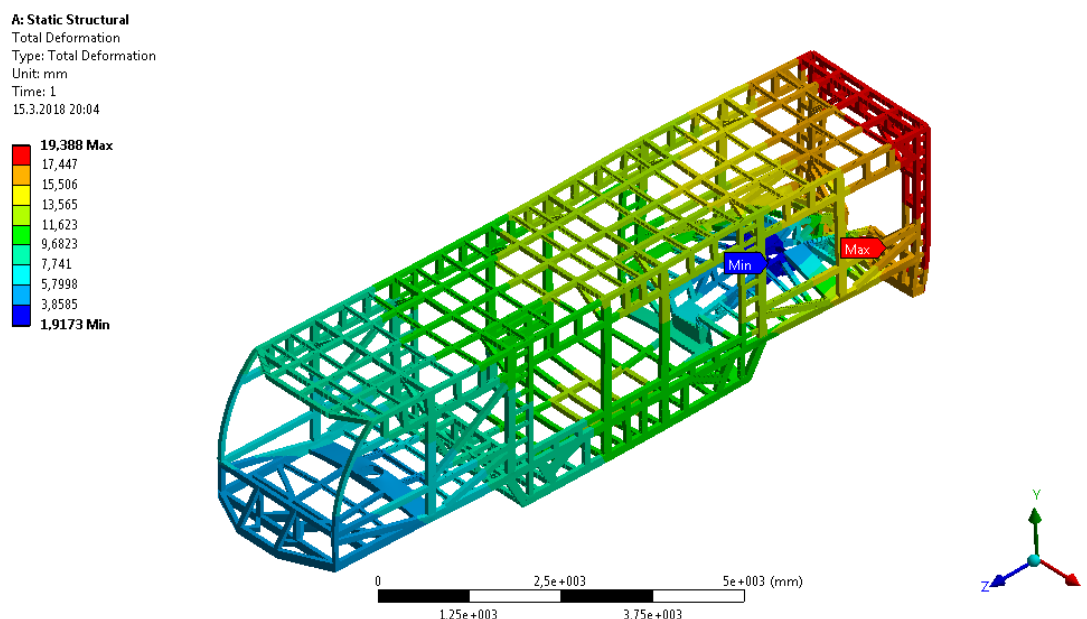
### 3.3.1. Výsledky ověřovacího výpočtu

Vhodnost navržených vyztužení je kontrolována na základě výsledků celkové deformace, ekvivalentního napětí v prvcích "shell" a kombinovaných napětí v prvcích "beam".

#### 3.3.1.1. Celková deformace

Maximální hodnota celkové deformace je v místě napojení ložiskového domku na příčník kloubu tedy v působišti síly od zavěšeného zadního článku. Celková deformace zde dosahuje hodnoty 19 mm, nicméně ve skutečnosti bude na tuto část navařen ložiskový domek, který zpevní navazující plechy proti průhybu a lze uvažovat mírné snížením hodnoty deformace. Společně s příčníkem kloubu je směrem dolů posunuta celá oblast čelnice, na ní jsou hodnoty celkové deformace přibližně 18 mm. Posunutí bočnice v místě středního podvozku je 13 mm, průhyb podlahy a střechy ve středu článku je 12 mm. Vzhledem k maximálnímu zatížení a celkovým rozměrům konstrukce jsou výsledné hodnoty přijatelné.

Spád deformace v okolí příčníku středního podvozku je stále největší, avšak již není tak výrazný, jako u nevyztuženého skeletu. Z hlediska celkové deformace se navržené vyztužení jeví jako vhodné. Rozložení hodnot deformace na skeletu je patrné z obrázku 32.



Obrázek 32 – Ověřovací výpočet, celková deformace

#### 3.3.1.2. Ekvivalentní napětí (von Mises)

Výsledky hodnot ekvivalentního napětí jsou v programu ANSYS k dispozici pouze pro prvky typu "shell" (v tomto případě). Maximální vypočtená hodnota je poněkud extrémní a je potřeba zhodnotit konkrétní místa pro určení její věrohodnosti. Celkové rozložení napětí na skeletu je zobrazeno na obrázku 33.

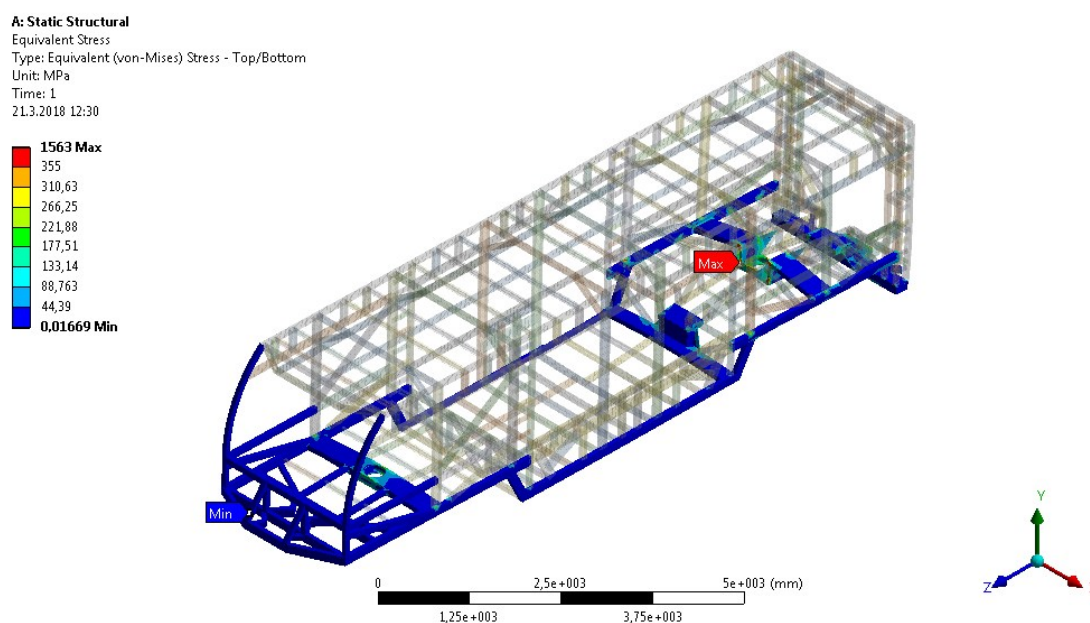
Extrémní hodnoty v místech napojení profilů na plechy jsou výsledkem zkreslení, které je způsobeno tím, jak jsou programem ANSYS provedeny kontakty prvků "beam". Kontakt



prvku "beam" s plochou je pouze bodový v ose profilu, nikoli v celé ploše odpovídající definovanému průřezu nosníku. To znamená, že veškeré síly přenášené z nosníku na plochu jsou umístěny do bodového působíště, a tedy zde logicky vznikají extrémní nereálné hodnoty. Ve skutečnosti jsou přenášené síly rozloženy do celé plochy průřezu nosníku a k takovéto špičce napětí nedojde.

Největší napětí jsou v místech napojení nosníků na příčník středního podvozku. Zde opět dochází k výše popsanému jevu koncentrace sil do jediného bodu. Dále je zde ostrý kontakt s plechovou výztuhou, který je ve skutečnosti odlehčen svarem. Dále budou přidány odlehčující úhelníky do míst styku nosníků s příčníky, které umožní ještě lepší rozložení sil a snížení napětí v místě styku. Na základě těchto výsledků budou stěny, na které se napojují nosníky, vyrobeny z plechu tloušťky 10 mm a ne 6 mm jak bylo původně zamýšleno.

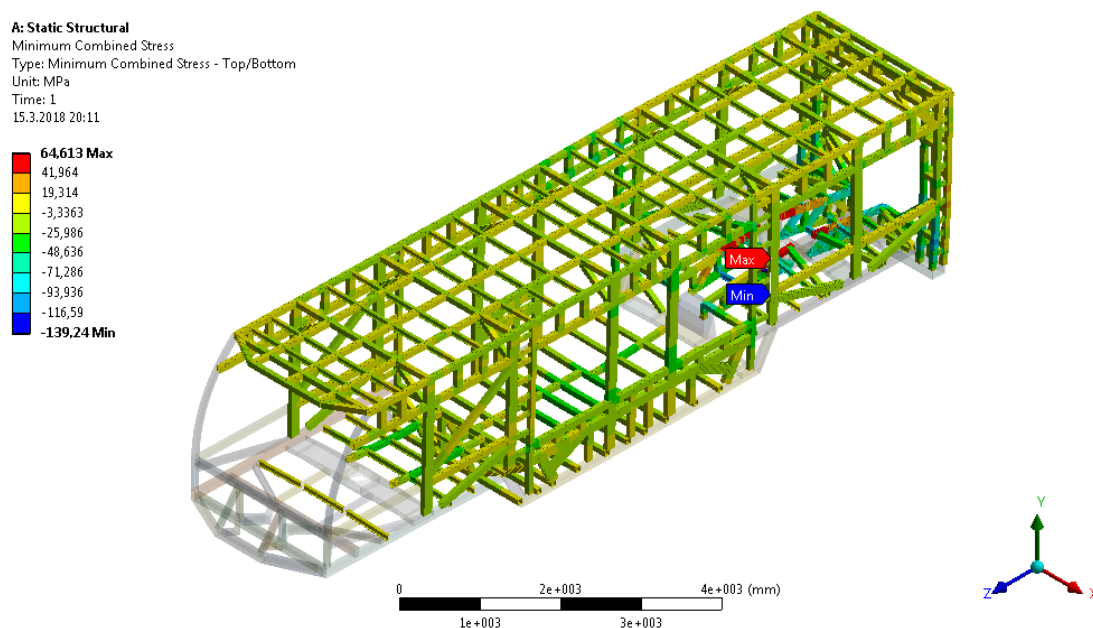
Na zvýšené napětí ve střední části příčníku v blízkosti otvoru pro uložení čepu podvozku není v této fázi brán zřetel, neboť do otvorů bude navařeno tělo čepu podvozku, které zásadně ovlivní deformační vlastnosti blízkého okolí. Jelikož práce pojednává o návrhu konceptu a jeho ověření, nejsou k dispozici přesné parametry čepu podvozku pro přesnější vymodelování daného místa a výsledky zde nejsou relevantní.



Obrázek 33 – Ověřovací výpočet, ekvivalentní napětí

### 3.3.1.3. Minimální kombinované napětí

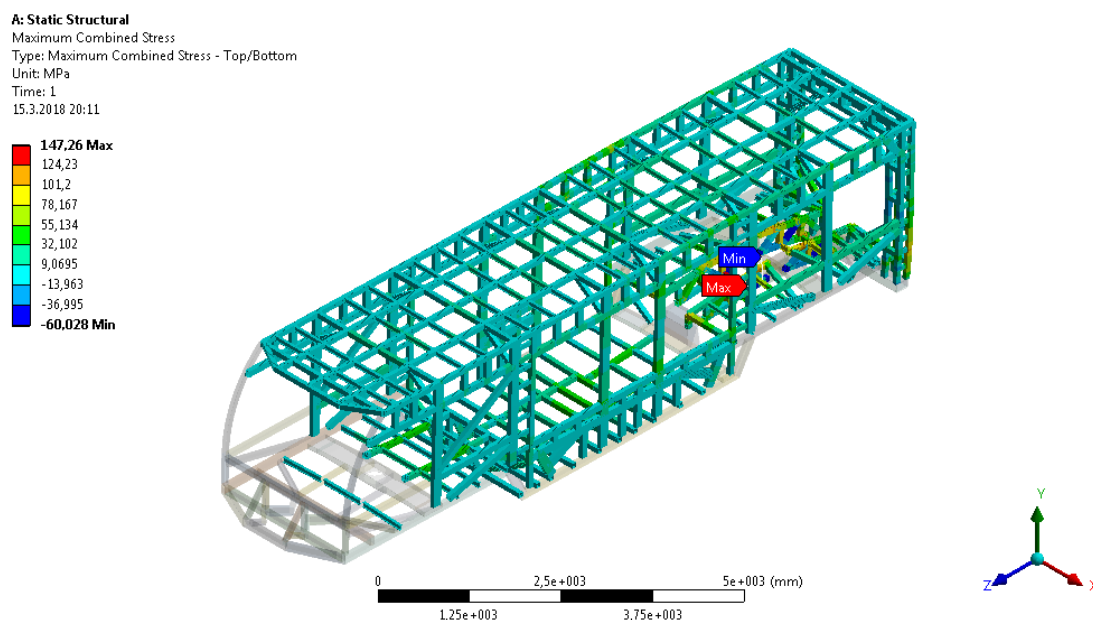
Jedná se o kombinaci minimálního ohybového napětí a napětí od osově síly v nosníku. Pro minimální napětí jsou kontrolovány nejnižší (záporné) hodnoty. Minimální hodnota je -139 MPa, což je hodnota s dostatečnou rezervou vůči mezi kluzu, a tedy nehrozí plastická deformace žádného z nosníků. Rozložení hodnot napětí je patrné z obrázku 34.



Obrázek 34 – Ověřovací výpočet, minimální kombinované napětí

### 3.3.1.4. Maximální kombinované napětí

Jedná se o kombinaci maximálního ohybového napětí a napětí od osově síly v nosníku. Pro maximální napětí jsou kontrolovány maximální hodnoty. Nejvyšší hodnota je 147 MPa, což je vzhledem k mezi kluzu hodnota přijatelná. Rozložení hodnot napětí lze vyčíst z obrázku 35.



Obrázek 35 – Ověřovací výpočet, maximální kombinované napětí

Z obou výsledků kombinovaných napětí v nosnících vyplývá, že celá nosníková část skeletu je vyhovující a není potřeba dalších úprav.



## 4. Kontrolní výpočet dle ČSN EN 15227

Norma ČSN EN 15227 (22) se zabývá požadavky na pasivní bezpečnost kolejových vozidel obecně. Opatření zavedená touto normou se snaží minimalizovat dopad nejběžnějších typů nehod při provozu kolejových vozidel na lidské životy. Požadavkem na vyhovění této normě je zachování základní konstrukční celistvosti prostorů pro cestující při kolizi.

Norma rozděluje železniční vozidla do čtyř konstrukčních kategorií v závislosti na charakteristikách železniční infrastruktury a typu provozu. Tramvajová vozidla spadají do kategorie C-IV. Pro tuto kategorii jsou definovány dva scénáře srážky. Prvním je srážka dvou totožných tramvajových vozů při vzájemné rychlosti 15 km/h, druhým je srážka tramvaje s pevnou překážkou o hmotnosti 3 t v rychlosti 25 km/h.

Vzhledem k tomu, že se práce zabývá návrhem koncepce a jejím ověřením v rámci studie proveditelnosti, nikoli přípravou finální výrobní dokumentace konkrétního vozidla, není možné provést dynamické simulace vozidla v plném rozsahu zmíněné normy. Zadavatel si je tohoto faktu vědom, a proto požaduje provedení zjednodušeného statického výpočtu dle vlastních požadavků vycházejících z dlouhodobých zkušeností. Úprava požadavků na výpočet inspirovaný normou ČSN EN 15227 je schválena vedoucím bakalářské práce.

Podmínky zjednodušeného výpočtu jsou následující.: Skelet zatížený vodorovnou tlakovou silou  $F = 250$  kN působící podélně v ose vozidla, v rovině spodku vozidla musí přenášet tuto sílu bez trvalých deformací.

Kromě zatěžující podélné síly je zohledněna i vlastní tíha skeletu, aby byla zajištěna porovnatelnost výpočtu s případnými, budoucími, reálnými zkouškami.

Model použitý pro výpočty je shodný s modelem z ověřovacího výpočtu (3.3), stejně tak i jeho síť.

V zájmu zkrácení zprávy je veškerá podrobnější grafická dokumentace tohoto výpočtu umístěna v příloze C.

### 4.1.1. Okrajové podmínky

Umístění podpor je shodné s návrhovým výpočtem (3.2.2.4).

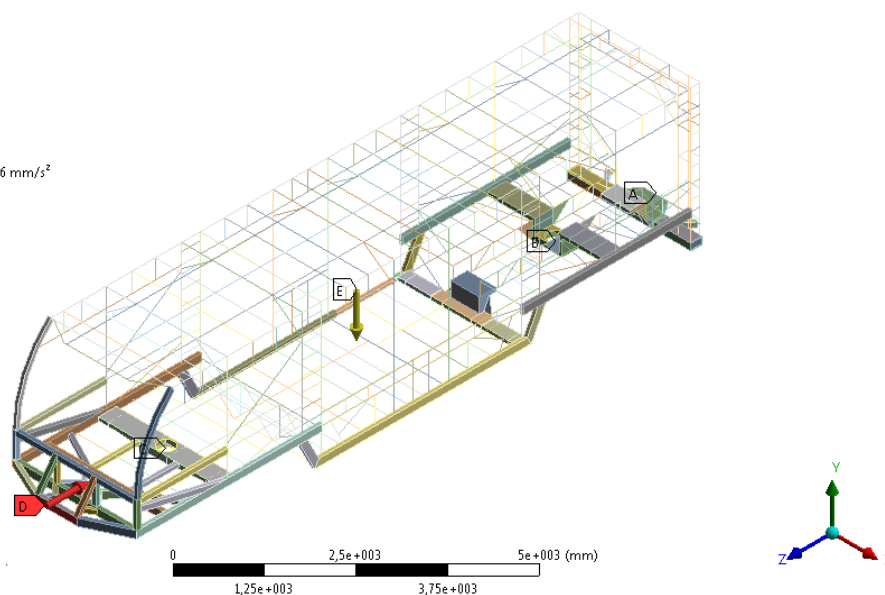
Zatěžující síla  $F = 250$  kN ve směru -Z je umístěna na čele skeletu, na absolutně tuhé ploše, která je v kontaktu s čelní plochou nejvíce vystupujícího čelního profilu ve výšce vysoké podlahy. Toto je nejnižší místo na čele skeletu odpovídající rovině spodku vozidla. Použitím absolutně tuhé plochy dotýkající se čelního profilu je zamezeno jeho nereálnému prohýbání, které se projevuje v návrhovém výpočtu (3.2.2.5).

Gravitační zrychlení "Standard Earth Gravity" zohledňující vlastní tíhu konstrukce je umístěno ve směru -Y.

Rozmístění podpor a zatížení na modelu je zřejmé z obrázku 36.

**B: Static Structural**  
 Static Structural  
 Time: 1, s  
 26.3.2018 13:45

**A** Displacement  
**B** Remote Displacement  
**C** Remote Displacement 2  
**D** Force: 2,5e+005 N  
**E** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s<sup>2</sup>



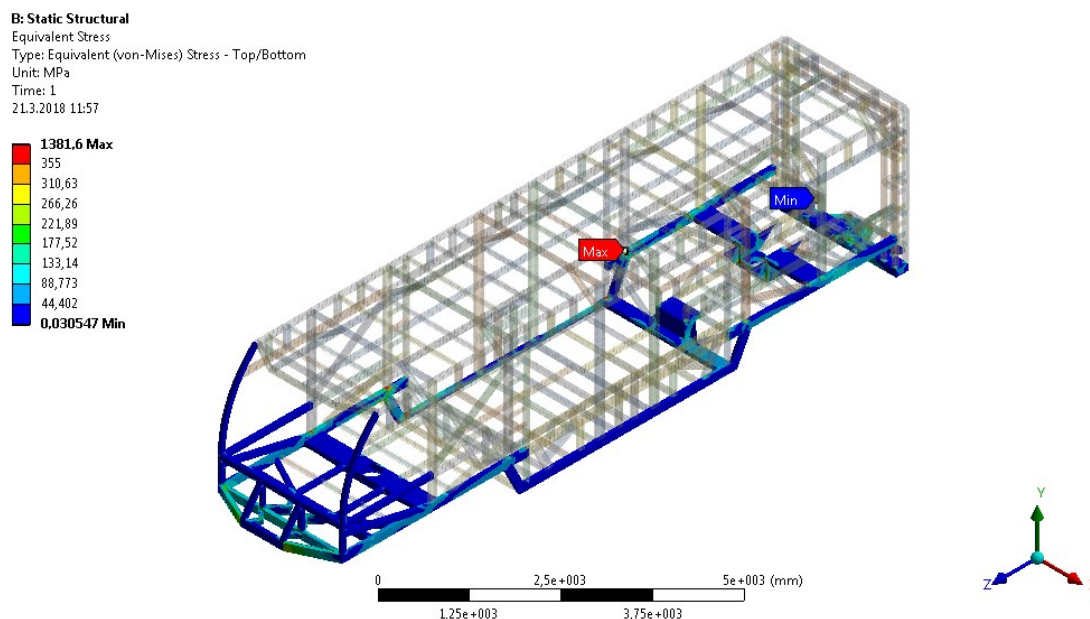
Obrázek 36 – Kontrolní výpočet, okrajové podmínky

#### 4.1.2. Výsledky kontrolního výpočtu dle ČSN EN 15227

Požadavkem je přenos zatížení bez trvalých deformací, proto jsou vyhodnoceny ekvivalentní napětí (von Mises) prvků "shell" a minimální a maximální kombinované napětí v prvcích "beam".

##### 4.1.2.1. Ekvivalentní napětí (von Mises)

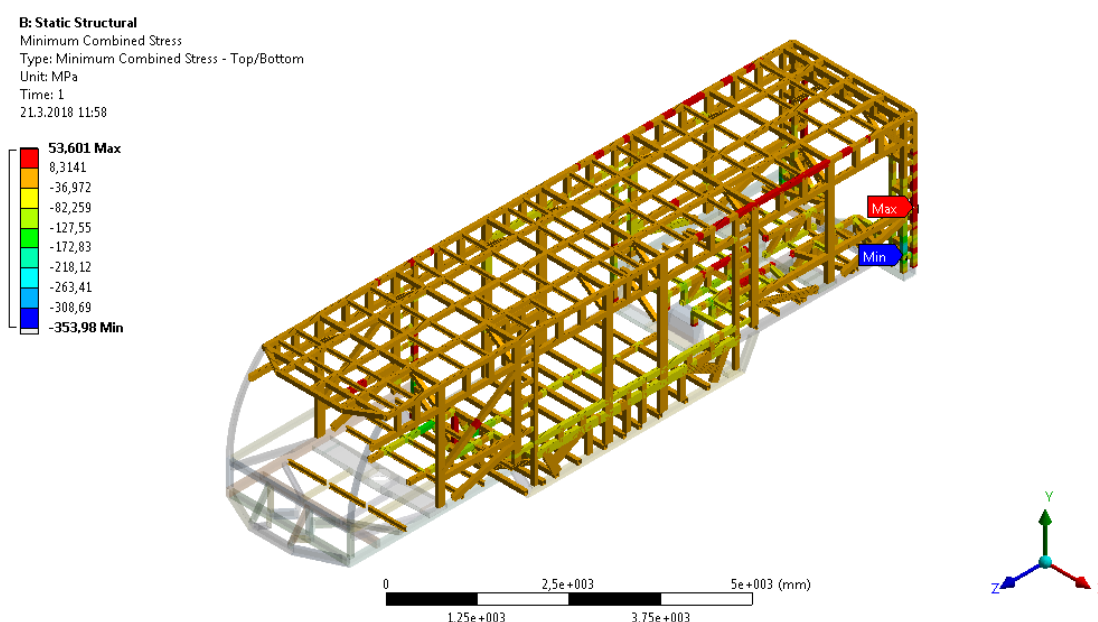
Maximální hodnoty ekvivalentního napětí jsou v místech napojení prvků "beam" na plochu. Dochází zde k jevu popsanému v 3.3.1.2, tedy k bodovému kontaktu prvků a tím vzniku singularity výpočtu. Výsledná hodnota napětí v těchto místech je způsobena nepřesností modelu a ve skutečnosti nenastane. Rozložení hodnot napětí na skeletu je patrné z obrázku 37. Z něj je zřejmé, že napětí v dostatečné vzdálenosti od vzájemného napojení nosníků se pohybují v hodnotách nižších, než 150 MPa. Výjimku tvoří šikmé nosníky na čele skeletu, kde, v blízkosti zatěžovaného nosníku, se hodnota napětí blíží 300 MPa. Získané hodnoty se pohybují pod mezí kluzu a jsou tedy vyhovující.



Obrázek 37 – Kontrolní výpočet dle ČSN EN 15227, ekvivalentní napětí

#### 4.1.2.2. Minimální kombinované napětí

Minimální hodnota kombinovaného napětí -354 MPa se nachází na nosníku levé bočnice v oblasti čelnice. Tato hodnota je v místě napojení dvou nosníků. Vzhledem ke konstrukci výpočtového modelu se jedná o průřezík os obou napojených profilů. Ve skutečnosti se v tomto místě žádné spojení nevyskytuje, nýbrž nosníky jsou napojeny na úrovni svých povrchů. Skutečný nosník je kratší, a tedy je na něm i nižší výsledný ohybový moment. Skutečné napětí v místě kontaktu nosníků pak přibližně odpovídá hodnotě napětí na průřeznici jejich povrchových ploch, která se pohybuje okolo 200 MPa, a tedy je vyhovující. Rozložení hodnot napětí na skeletu je zobrazeno na obrázku 38.

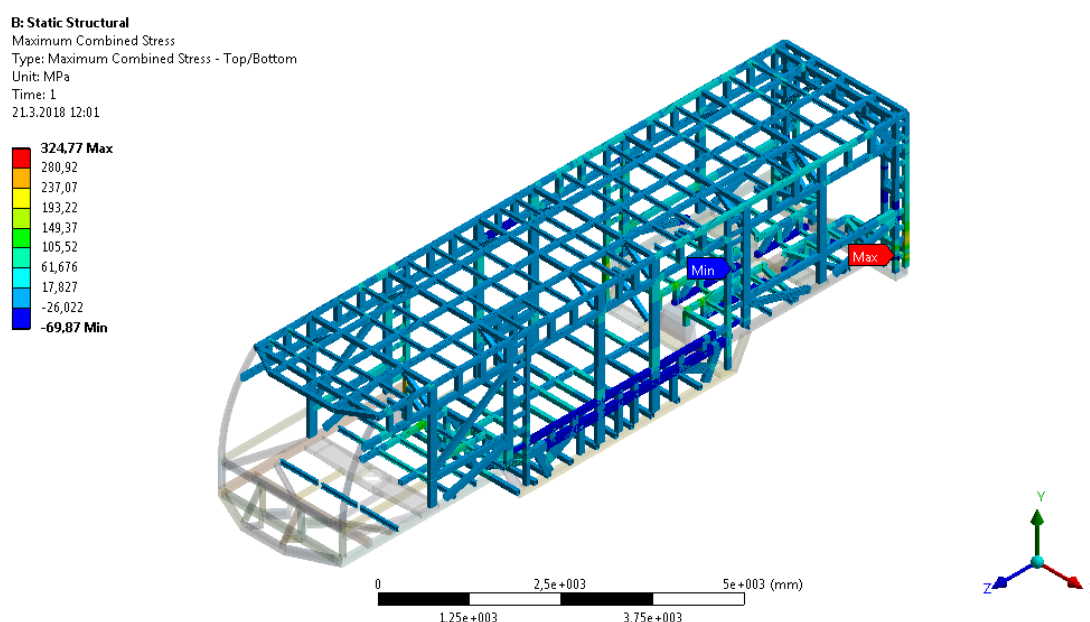


Obrázek 38 – Kontrolní výpočet dle ČSN EN 15227, minimální kombinované napětí

Z obrázku je patrné, že hodnoty minimálního kombinovaného napětí jsou na celém skeletu převážně kladné, a tedy z jejich podstaty nesměrodatné. Záporné hodnoty nejsou nižší než -200 MPa což je vyhovující.

#### 4.1.2.3. Maximální kombinované napětí

Maximální hodnota 325 MPa odpovídá oblasti minimálního kombinovaného napětí -354 MPa a na její posouzení je aplikována stejná logika, jako v předchozím odstavci. Rozložení hodnot napětí na skeletu je patrné z obrázku 39. Nejvyšší hodnoty jsou pozorovány v místech napojení obvodových nosníků podlahy na vnější sloupky dveří a ve spodní části čelnice, kde lehce překračují hodnotu 200 MPa. Podmínka nepřekročení meze kluzu je opět splněna.



**Obrázek 39 – Kontrolní výpočet dle ČSN EN 15227, maximální kombinované napětí**

Až na extrémní hodnoty napětí, vznikající v místech nepřesností výpočtového modelu, které jsou zanedbány, nedochází k překročení meze kluzu v žádném skutečném místě skeletu. V tomto stádiu návrhu skeletu jsou pro ověření směrodatné především hodnoty napětí v průběhu celého nosníku a nikoli v jejich uzlech, které nejsou přesně definovány. Vzneseným požadavkům na odolnost skříně je vyhověno.

## Závěr

Cílem práce bylo navrhnout konstrukci svařovaného skeletu dvoučlankové nízkopodlažní jednosměrné tramvaje a tento koncept ověřit pro studii proveditelnosti.

Konstrukce je navržena na základě poznatků získaných z průzkumu současného stavu techniky v oblasti dvoučlankových tramvají. Navržené koncepční řešení rozvržení tramvaje odpovídá požadavkům zadavatele a vychází ze základních rozměrů předběžné designové studie. Výchozí rozměry byly podle příslušné normalizace ověřeny s kladným výsledkem.

Vyztužení skeletu, navržené na základě návrhového MKP výpočtu, provedeného při zatížení jak provozním, tak i tlakovou silou na čele skříně, bylo pomocí ověřovacího MKP výpočtu zhodnoceno jako vyhovující.

V poslední části práce bylo zjišťováno vyhovění normě ČSN EN 15227. Jelikož se práce zabývá koncepčním návrhem skeletu pro studii proveditelnosti a nikoli návrhem finální výrobní dokumentace tramvaje, nemohla být tato norma, vztahující se na dynamické zkoušky a ověření kompletně navržených vozidel, plně aplikována. Zadavatel si je tohoto faktu vědom, a proto byl, se souhlasem vedoucího bakalářské práce, proveden zjednodušený kontrolní MKP výpočet dle požadavků zadavatele vycházejících z jeho praktických zkušeností v této problematice.

Z důvodu toho, že se jedná o koncepční návrh skeletu, jsou výsledky jednotlivých MKP výpočtů směrodatné především v průběhu celých jednotlivých nosníků a nikoli v jejich uzlech, které, vzhledem k povaze návrhu, nejsou přesně definovány.

V této problematice je nemožné určit nejlepší konstrukční řešení skeletu. Každá koncepce tramvaje, rozložení podvozků či technologie výroby skeletu má své výhody i nevýhody a je možné pouze udržet přiměřenou rovnováhu mezi jednotlivými kvalitativními parametry, což se v navrhovaném řešení podařilo. Všechny cíle a vznesené požadavky na konstrukci skeletu a jeho odolnost jsou naplněny. Práce byla předána zadavateli a ten je s dosaženými výsledky spokojen.

## ZDROJE

1. HELLER Petr a Josef DOSTÁL. *Kolejová vozidla II*. Plzeň : Západočeská univerzita, 2009. ISBN: 978-80-7043-641-7.
2. HELLER Petr a Josef DOSTÁL. *Kolejová vozidla III*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2011. ISBN: 978-80-261-0028-7.
3. MHD-Ostrava, K2. *MHD-Ostrava* [Online]. 9.9.2012 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: [http://www.mhd-ostrava.cz/index.php?s=typ\\_vozu&clanek=k2&filtr=\(%20typ%20LIKE%20%27K2%27%20\)%20AND%20\(%20ucel%20=%20%27pr%27%20OR%20ucel%20=%20%27hi%27%20\)](http://www.mhd-ostrava.cz/index.php?s=typ_vozu&clanek=k2&filtr=(%20typ%20LIKE%20%27K2%27%20)%20AND%20(%20ucel%20=%20%27pr%27%20OR%20ucel%20=%20%27hi%27%20))
4. Tatra K2. *Wikipedie:Otevřená encyklopedie* [Online]. 27.1.2018 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Tatra\\_K2](https://cs.wikipedia.org/wiki/Tatra_K2)
5. 1095 - Tramvaj K2. *Technické muzeum v Brně, expozice MHD* [Online]. SAB DIGITAL, 2013 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <http://www.sabdigital.com/expozicemhd/?akce=exponaty-tramvaje-brno-1095-tramvaj-k2>
6. Pars nova a.s. *Parsnova* [Online]. [Cit. 13.3.2018]. Dostupné z: <http://www.parsnova.cz/admin/files/ModuleText/8-K2S.pdf>
7. Gelenktriebwagen NGT6DE. *Wikipedia: Die freie Enzyklopädie* [Online]. 18.12.2017 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: [https://de.wikipedia.org/wiki/Gelenktriebwagen\\_NGT6DE](https://de.wikipedia.org/wiki/Gelenktriebwagen_NGT6DE)
8. MÜLLER, M. MHD v Desavě. *thriller.borec*. [Online] 6.4.2017 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: [http://thriller.borec.cz/mhd/mhd\\_svet/nemecko/desava.html](http://thriller.borec.cz/mhd/mhd_svet/nemecko/desava.html)
9. KRUMNOW, M. NGT6DE. *Tram-Mitteldeutschland*. [Online] 2007-2016 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <http://www.tram-mitteldeutschland.de/index.php/de/Dessau-Rosslau?id=13>
10. BOMBARDIER. FLEXITY Classic – Dessau, Germany. *Bombardier*. [Online] 1997-2018 [Cit. 13.3.2018.] Dostupné z: <https://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-vehicles/light-rail-vehicles/flexity-trams.html>
11. VarioLF2. *Wikipedie:Otevřená encyklopedie* [Online]. 18.9.2017 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/VarioLF2>
12. MHD-Ostrava. VarioLF2. *MHD-Ostrava* [Online]. 6.2.2014 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: [http://www.mhd-ostrava.cz/index.php?s=typ\\_vozu&clanek=lf2&filtr=\(%20typ%20LIKE%20%27VarioLF2%27%20AND%20NOT%20typ%20LIKE%20%27VarioLF2%2B%27%20\)%20AND%20\(%20ucel%20=%20%27pr%27%20OR%20ucel%20=%20%27hi%27%20\)](http://www.mhd-ostrava.cz/index.php?s=typ_vozu&clanek=lf2&filtr=(%20typ%20LIKE%20%27VarioLF2%27%20AND%20NOT%20typ%20LIKE%20%27VarioLF2%2B%27%20)%20AND%20(%20ucel%20=%20%27pr%27%20OR%20ucel%20=%20%27hi%27%20))

13. DPO [Dopravní Podnik Ostrava]. Tramvaje. *Dopravní Podnik Ostrava* [Online]. 3.2018 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <https://www.dpo.cz/o-spolecnosti/vozy/tramvaje.html>
14. KOS [Krnovské opravny a strojírny]. Tramvaje Vario. *Krnovské opravny a strojírny* [Online]. [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <http://kos.cz/index.php?id=tramvaj-vario&lang=cz>
15. PRAGOIMEX a.s. Tramvaj Vario LF2. *Pragoimex* [Online]. [Cit. 13.3.2018]. Dostupné z: <http://www.pragoimex.cz/page/tramvaj-variolf2-45>
16. EVO2. *Wikipedie:Otevřená encyklopedie* [Online]. 23.11.2016 [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/EVO2>
17. PRAGOIMEX a.s. Bezbariérová tramvaj EVO2. *Pragoimex* [Online]. MediaFábrika [Cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <http://www.pragoimex.cz/page/bezbarierova-tramvaj-evo2-43>
18. PRAGOIMEX a.s. EVO2. *Pražské tramvaje* [Online]. 2001-2018 [Cit. 21.3.2018]. Dostupné z: [http://www.prazsketramvaje.cz/clanky/evo2\\_prospekt.pdf](http://www.prazsketramvaje.cz/clanky/evo2_prospekt.pdf)
19. ČSN 28 0337, 1994. *Obrysy pro tramvajová vozidla*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut.
20. BOHDAN BOLZANO s.r.o. Technické dodací předpisy, uzavřené duté profily tvářené za studena. *Bolzano* [Online]. 2018 [Cit. 25.3.2018]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/uzavrene-dute-profily/uzavrene-dute-profily-tvarene-za-studena/technicke-dodaci-predpisy-tdp>
21. ČSN 28 1300, 1998. *Tramvajová vozidla – Technické požadavky a zkoušky*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut.
22. ČSN EN 15227+A1, 2011. *Železniční aplikace – Požadavky na odolnost skříní železničních vozidel proti nárazu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – Doprovodná grafická dokumentace návrhového výpočtu

Příloha B – Doprovodná grafická dokumentace ověřovacího výpočtu

Příloha C – Doprovodná grafická dokumentace kontrolního výpočtu

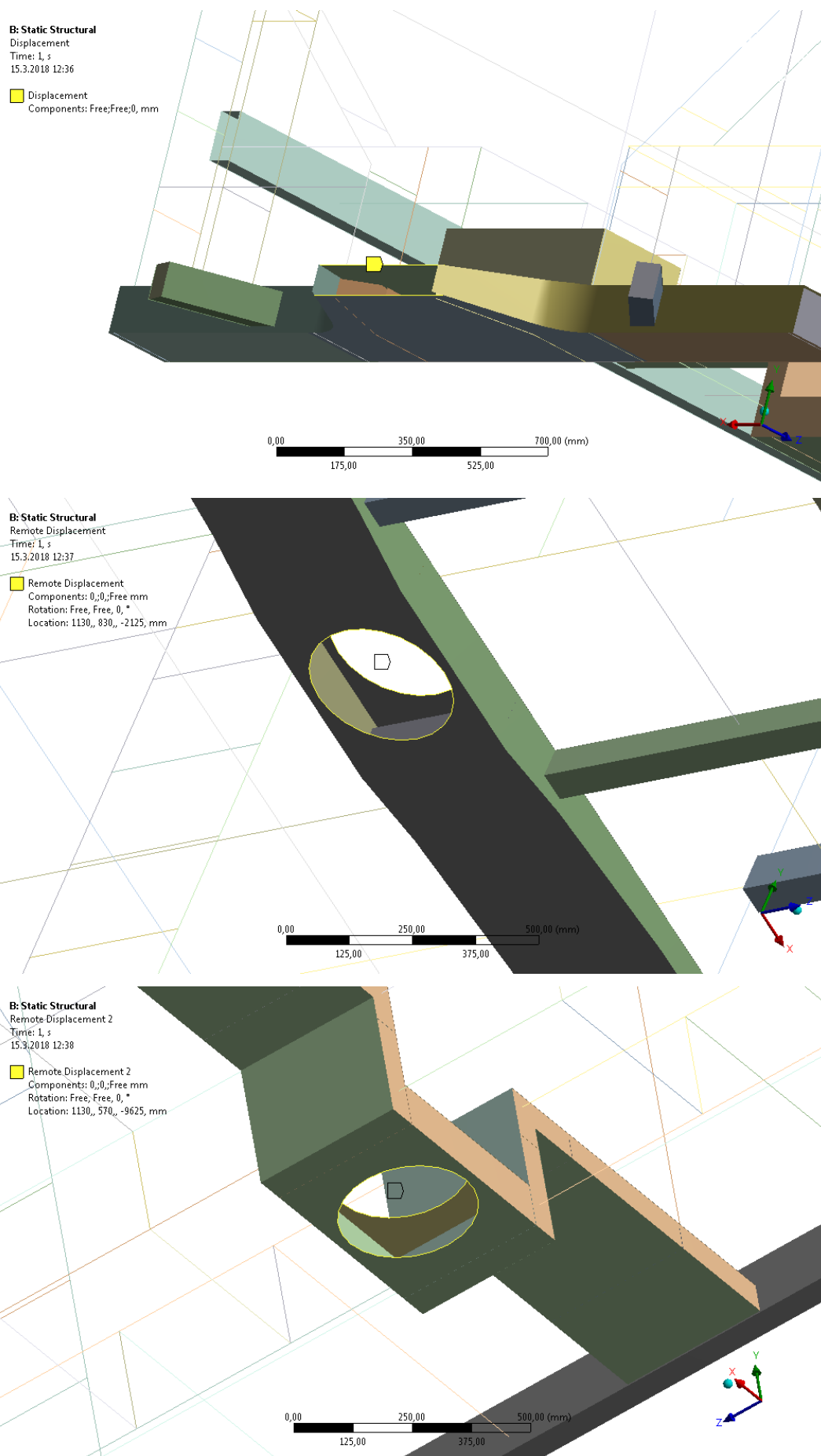
Příloha D – Sestavný výkres skeletu tramvaje

Příloha E – Výrobní výkres hlavního plechu příčnicku kloubového spojení

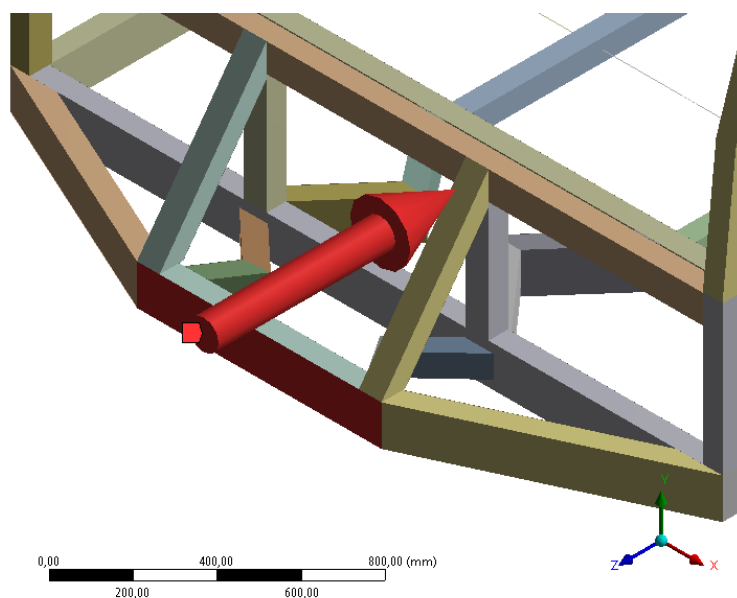
Zvláštní příloha CD – obsahuje textovou část bakalářské práce a přílohy v elektronické podobě



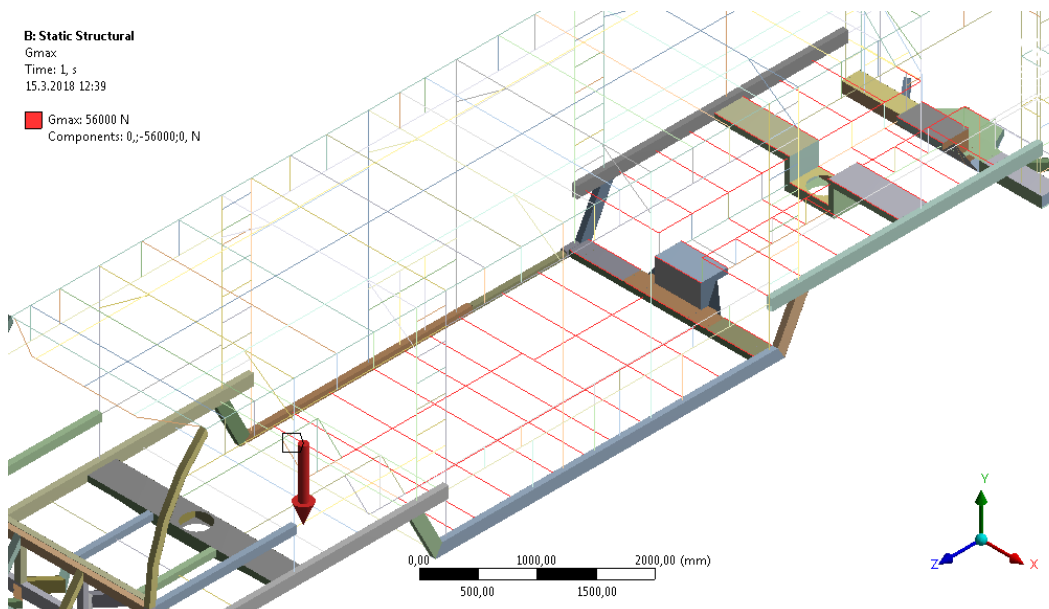
## Příloha A – Doprovodná grafická dokumentace návrhového výpočtu



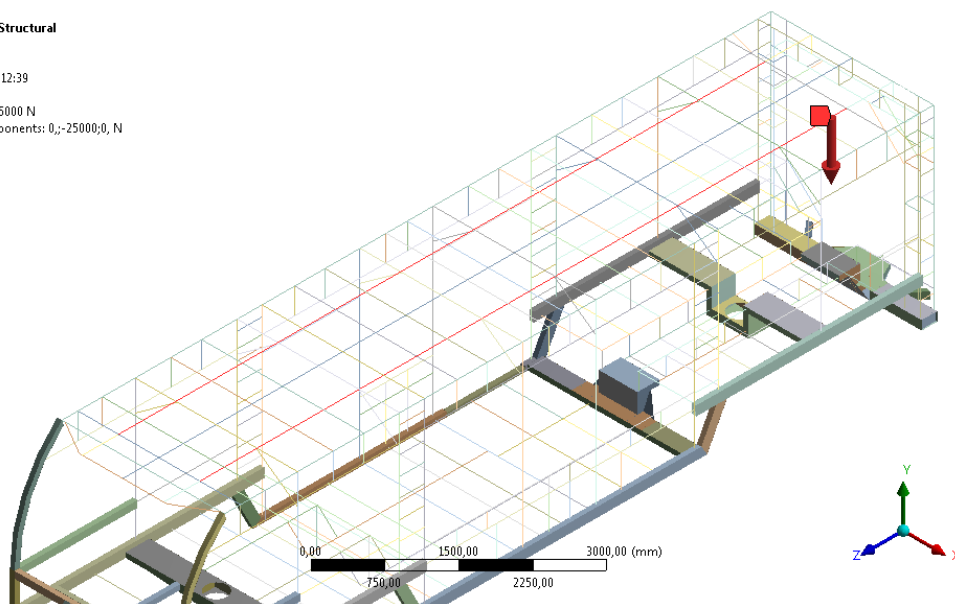
**B: Static Structural**  
F  
Time: 1, s  
15.3.2018 12:39  
F: 25000 N  
Components: 0,0,-25000 N



**B: Static Structural**  
Gmax  
Time: 1, s  
15.3.2018 12:39  
Gmax: 56000 N  
Components: 0,-56000,0 N




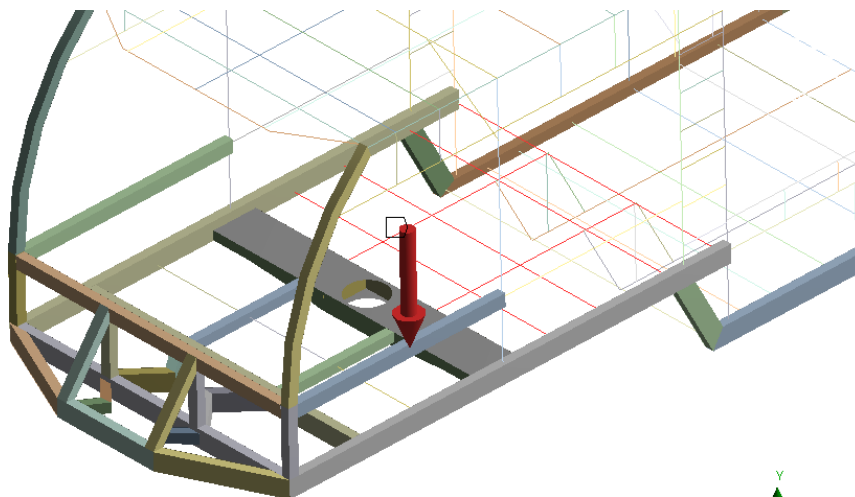
**B: Static Structural**  
Fts  
Time: 1, s  
15.3.2018 12:39  
Fts: 25000 N  
Components: 0,-25000,0 N



**B: Static Structural**

Ftk  
Time: 1, s  
15.3.2018 12:39


 Ftk: 10000 N  
Components: 0,-10000,0, N

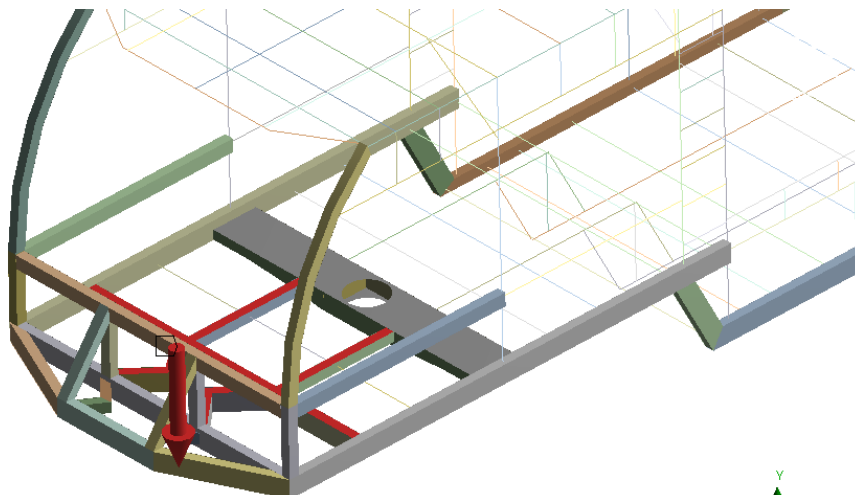


0,00 500,00 1000,00 1500,00 2000,00 (mm)

**B: Static Structural**

Fk  
Time: 1, s  
15.3.2018 12:40


 Fk: 2500, N  
Components: 0,-2500,0, N

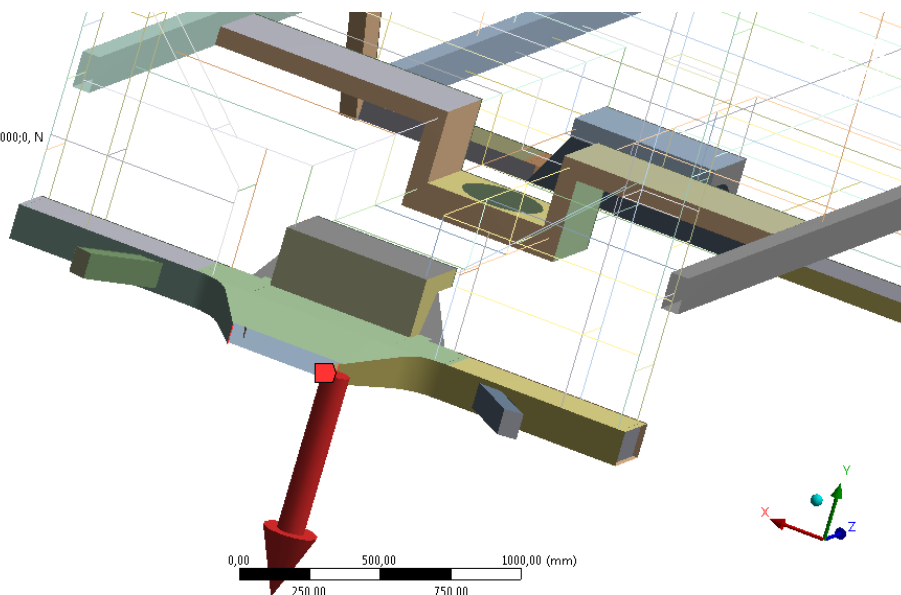


0,00 500,00 1000,00 1500,00 2000,00 (mm)

**B: Static Structural**

Fz  
Time: 1, s  
15.3.2018 12:40

 Fz: 70000 N  
Components: 0,-70000,0, N



0,00 250,00 500,00 750,00 1000,00 (mm)

**B: Static Structural**

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

15.3.2018 12:22

**40,607 Max**

27,286

20,785

18,625

16,465

14,306

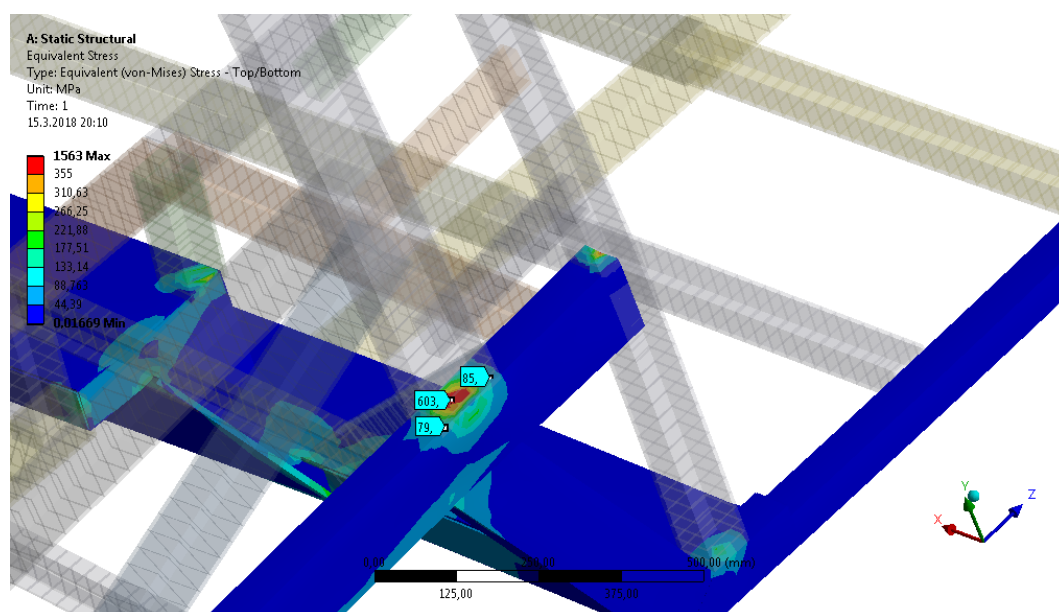
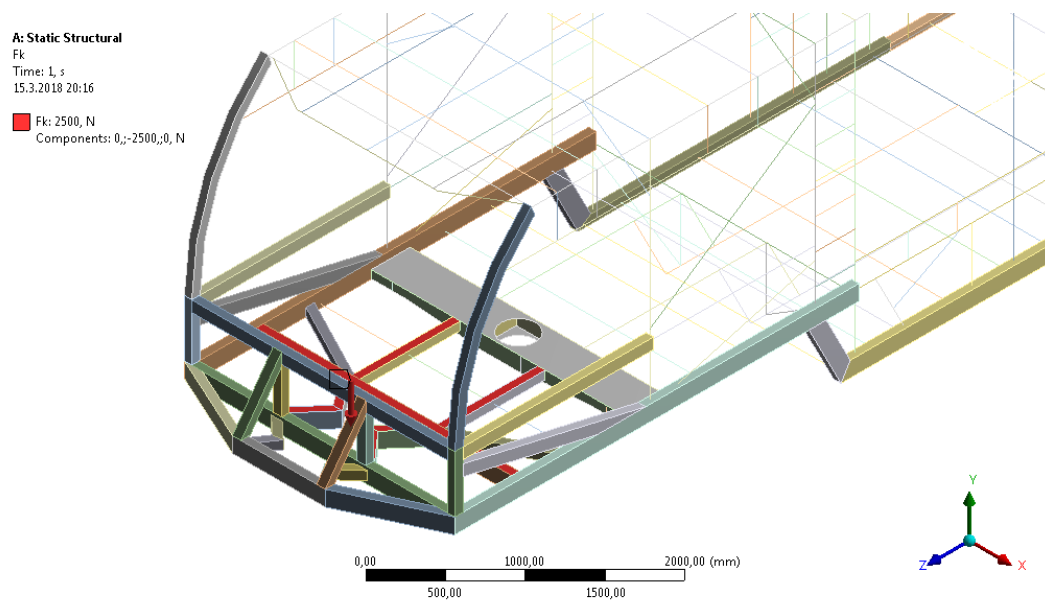
12,146

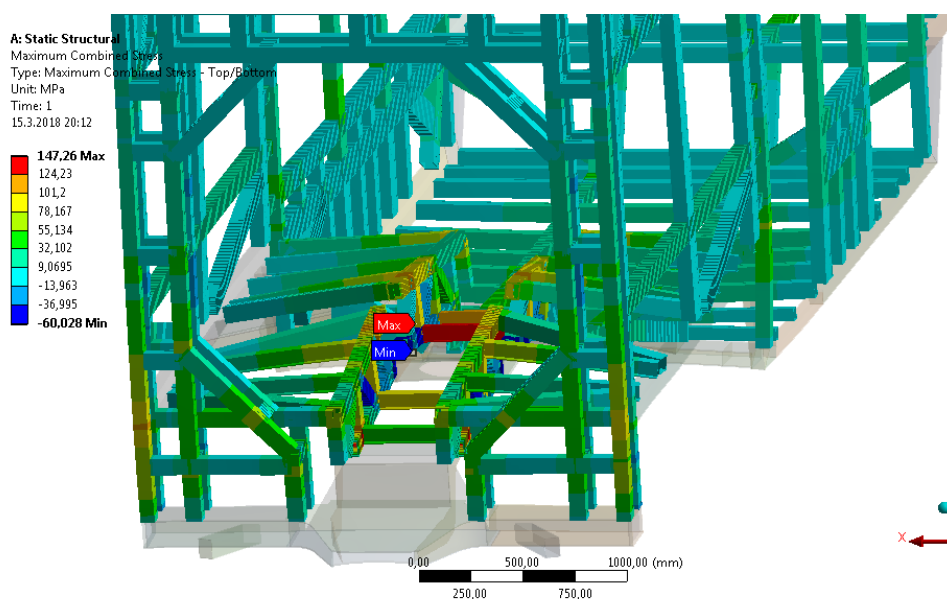
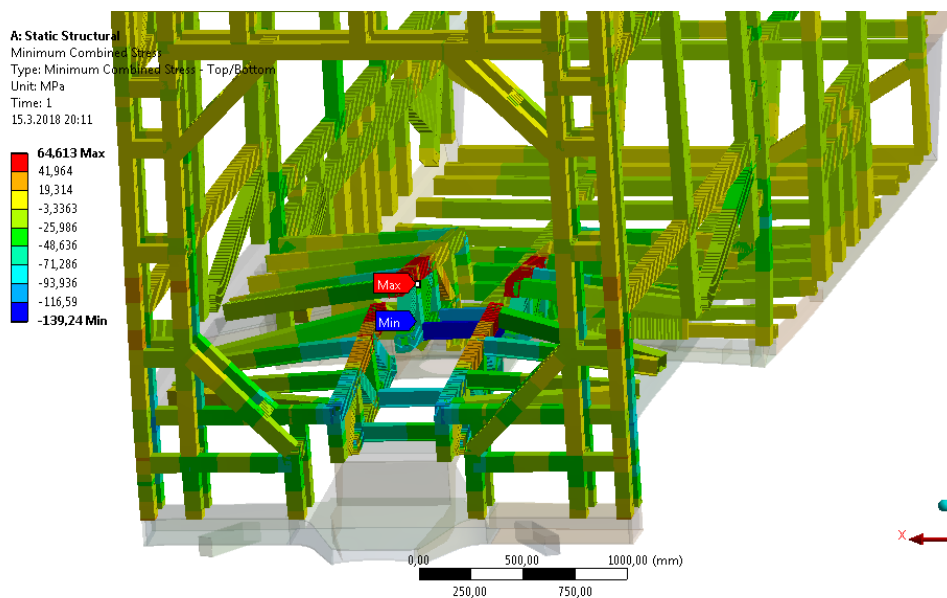
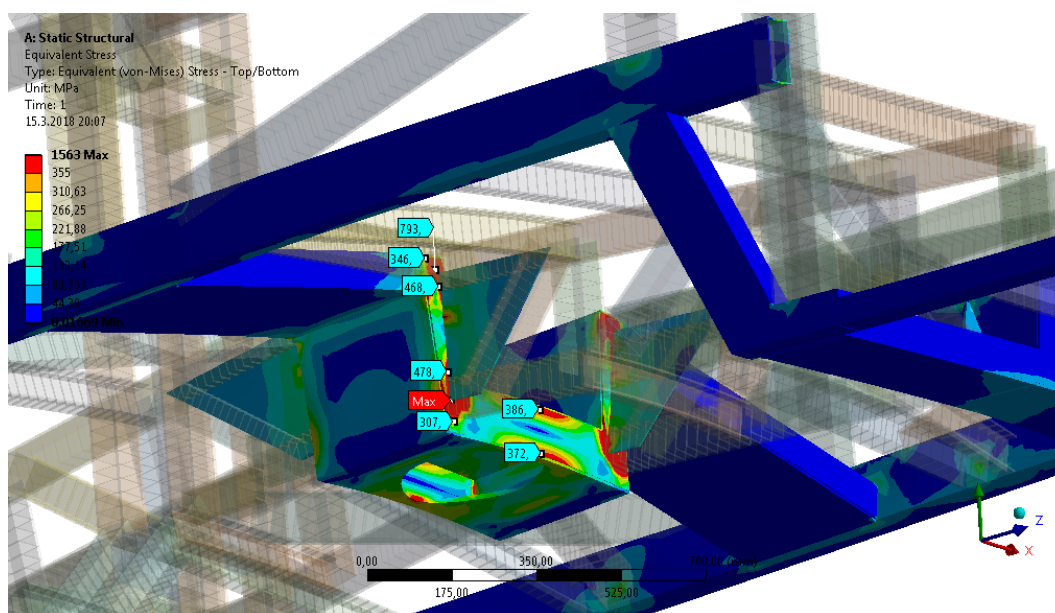
9,9862

7,8264

**5,6666 Min**

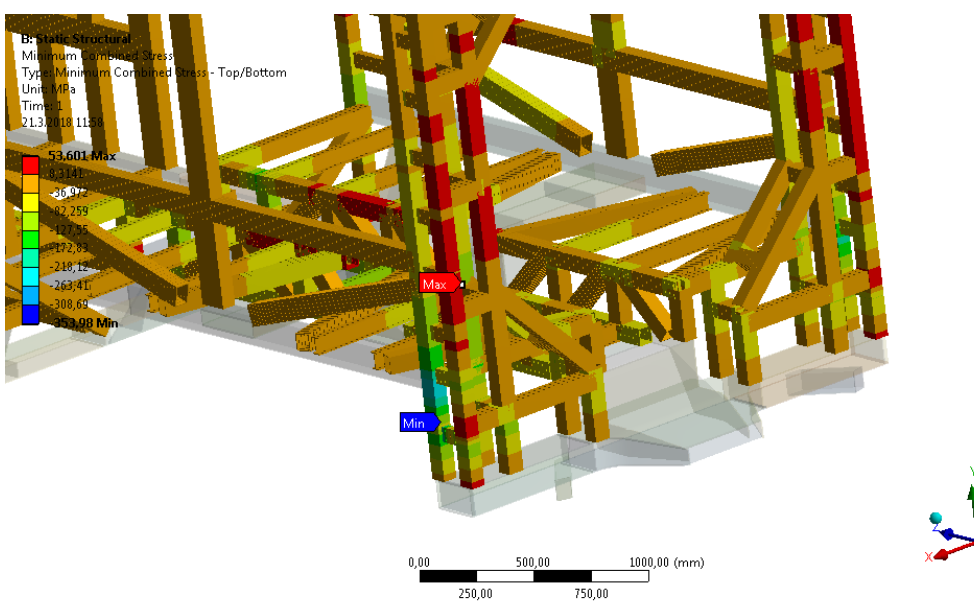
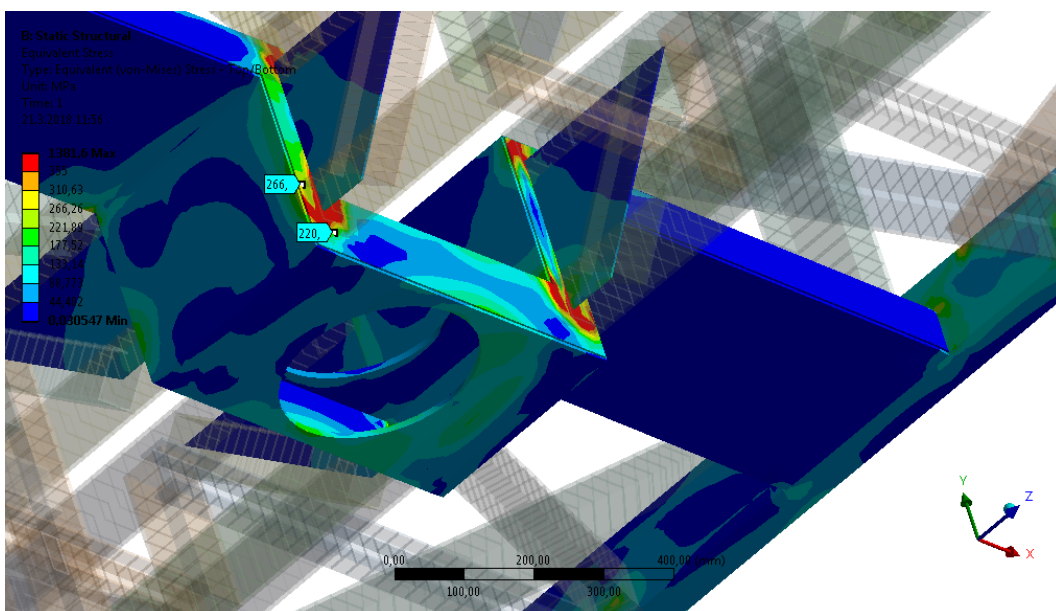
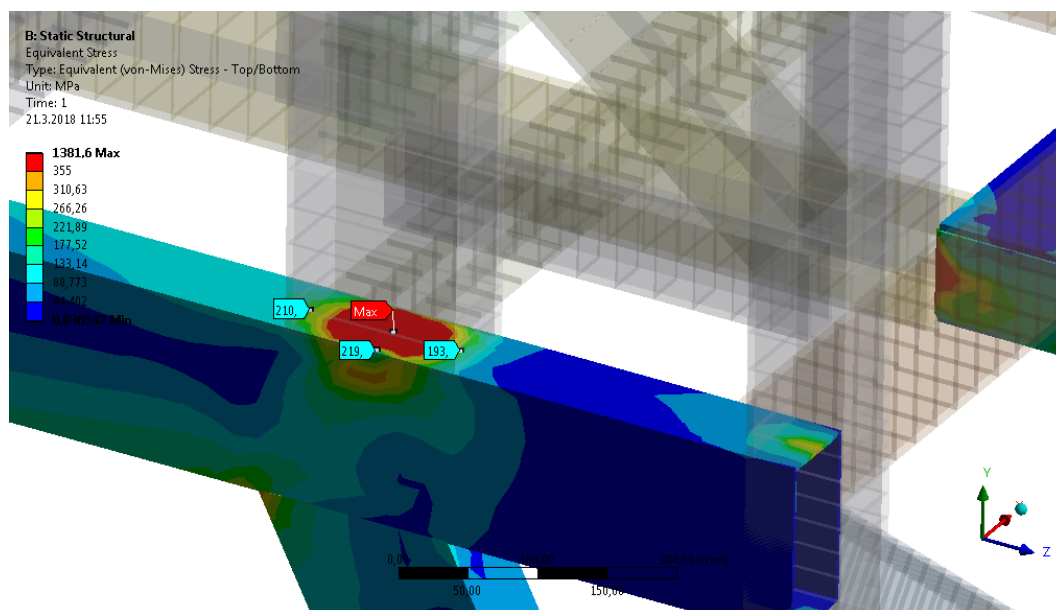
## Příloha B – Doprovodná grafická dokumentace ověřovacího výpočtu





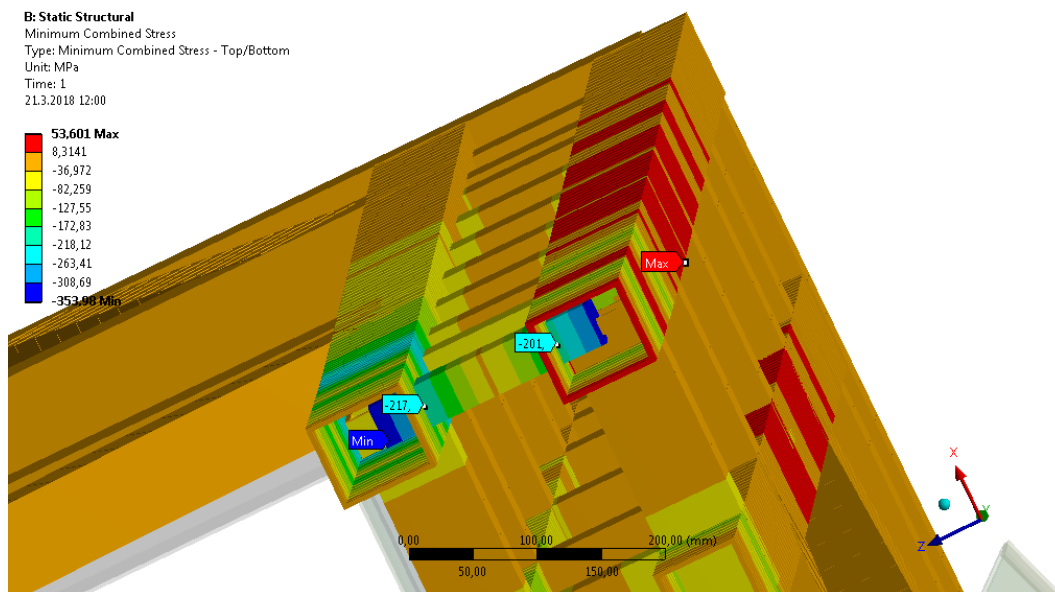


## Příloha C – Doprovodná grafická dokumentace kontrolního výpočtu



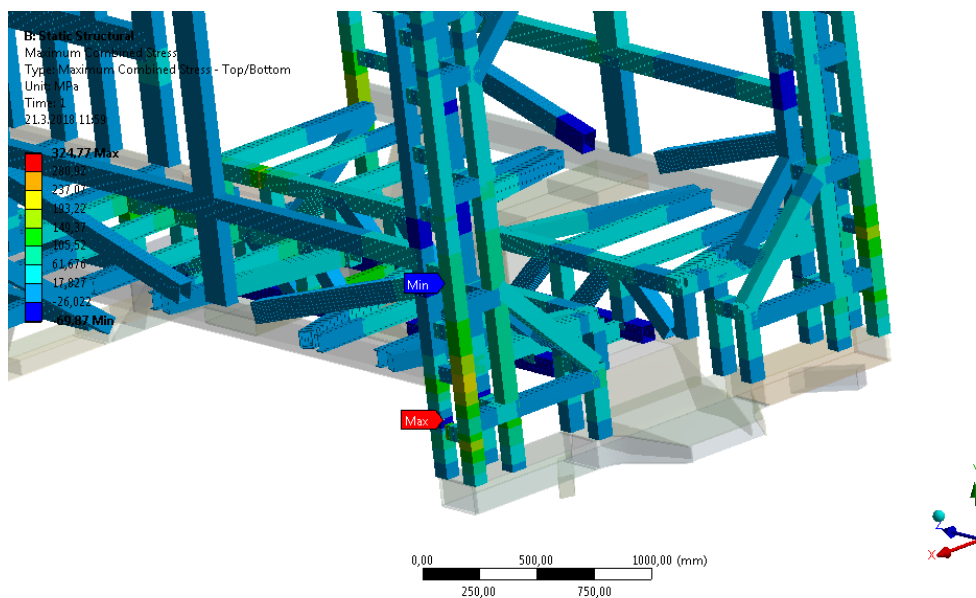
**B: Static Structural**  
Minimum Combined Stress  
Type: Minimum Combined Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1  
21.3.2018 12:00

53,601 Max  
8,3141  
-36,972  
-82,259  
-127,55  
-172,83  
-218,12  
-263,41  
-308,69  
-353,98 Min



**B: Static Structural**  
Maximum Combined Stress  
Type: Maximum Combined Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1  
21.3.2018 11:59

324,77 Max  
280,92  
237,07  
193,22  
149,37  
105,52  
61,676  
17,827  
-26,022  
-69,97 Min



**B: Static Structural**  
Maximum Combined Stress  
Type: Maximum Combined Stress - Top/Bottom  
Unit: MPa  
Time: 1  
21.3.2018 11:59

324,77 Max  
280,92  
237,07  
193,22  
149,37  
105,52  
61,676  
17,827  
-26,022  
-69,97 Min

